



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JARKKO VÄLITALO
ENERGIAN KERÄÄMINEN MEKAANISESTA VÄRÄHTELYSTÄ IN-
DUKTIIVISILLA MENETELMILLÄ

Diplomityö

Tarkastaja:
Tutkimuspäällikkö Pekka Ruuskanen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
31. lokakuuta 2018

TIIVISTELMÄ

JARKKO VÄLITALO: Energian kerääminen mekaanisesta värähtelystä induktiivisilla menetelmillä

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 50 sivua, 0 liitesivua

Joulukuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sulautetut järjestelmät

Tarkastaja: Tutkimuspäällikkö Pekka Ruuskanen

Avainsanat: energian kerääminen, sähkömagnetismi, induktio, mekaaninen värähtely

Tämän työn tavoitteena on ymmärtää induktiivisten keräimien sähköiseen kuormaan tuottaman tehon suuruuteen vaikuttavia tekijöitä. Tämän lisäksi työssä kehitetään lineaarisesti toimivaa prototyyppikeräintä, jossa hyödynnetään induktiivista energianmuutostekniikkaa. Kehitystyön tavoitteena on saada induktiivinen keräin tuottamaan kokonaisuudessaan matalatehoisen elektroniikan tarvitseva sähköenergia mekaanisesta värähtelystä, jolloin käytännön sovelluksissa saavutettaisiin riippumattomuus erillisistä pattereista ja akuista.

Diplomityön on jaoteltu kahteen osioon. Kirjallisuustutkimuksessa perehdytään yksinkertaisen lineaarisesti toimivan induktiivisen keräimen toimintaperiaatteeseen ja sen matemaattiseen mallintamiseen. Keräimen yksinkertaisen rakenteen ansiosta sen käyttäytyminen tunnetaan hyvin ja sen tuottaman tehoon vaikuttavat fysikaaliset tekijät on voitu mallintaa tarkasti. Tämän lisäksi kirjallisuussosiossa esitellään lyhyesti menetelmiä, joilla induktiivisen keräimen suorituskykyä voidaan potentiaalisesti kasvattaa. Kirjallisuudessa on esitetty useita lineaarisia ja epälineaarisia menetelmiä, joilla on pystytty kasvattamaan induktiivisen keräimen tuottamaa tehoa tai sen taajuuskaistaa. Diplomityön tutkimusosassa rakennetaan kaksi prototyyppikeräintä, joiden toimintaa ja tehokkuutta mitataan altistettuna voimakkuuksiltaan eri suuruisille ulkoisille värähtelyille. Mittauksilla on tarkoituksena selvittää, voidaanko induktiivinen keräin miniatyrisoida kompaktiin kokoon siten, että se pystyy vielä tuottamaan riittävän määrän tehoa elektroniikan tarpeisiin.

Rakennettujen induktiivisten keräimien mittauksissa ulkoisena energianlähteenä käytettiin amplitudiltaan muutaman millimetrin suuruista mekaanista värähtelyä. Värähtelyn voimakkuutta kasvatettiin mittausten aikana asteittain ja keräimien kokema kiihtyvyys nousi jopa 90g:en. Prototyyppikeräin 1 tuotti mittauksissa parhaimmillaan 349,6 mW:n maksimi- sekä 139,7 mW:n jatkuvan keskimääräisen tehon. Vastaavasti prototyyppikeräin 2:lle mitattiin parhaimmillaan 212,4 mW:n maksimi- ja 76,46 mW:n jatkuva keskimääräinen teho. Molempien keräimien tuottaman tehon arvioidaan hyvin riittävän matalatehoisen elektroniikan tarpeisiin.

ABSTRACT

JARKKO VÄLITALO: Energy harvesting from mechanical vibration using electromagnetic methods

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 50 pages, 0 Appendix pages

December 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Embedded Systems

Examiner: Research Manager Pekka Ruuskanen

Keywords: energy harvesting, electromagnetism, induction, mechanical vibration

The aim of this thesis is to comprehend what factors affect the power generated by an electromagnetic harvester. In the thesis, also a prototype of a linear electromagnetic harvester is being developed. The development of the harvester aims to produce a sufficient amount of power from the mechanical vibrations for a low-power application. In such a case, independence from external batteries and accumulators could be achieved.

The thesis is divided into two sections. In the literature section of the thesis, the operating principle and the mathematical modelling of the electromagnetic harvester is presented. Due to the well-known behavior of the harvester, there are plenty of researches in the literature that focus on the effects, which improve the performance of the harvester. In the thesis, several of these linear and nonlinear methods are briefly presented. In the practical section of the thesis, two different size of electromagnetic harvesters are built for the testing, which is done with various mechanical vibrations. The testing procedure aims to determine, if electromagnetic harvesters can be miniaturized into a compact size so that the amount of the produced power is still within the usable range.

In the testing, the built prototypes were configured to harvest energy from the mechanically produced vibrations. The amplitudes of the produced vibrations were only couple of millimeters, but the accelerations on the vibration were much higher and the maximum acceleration measured were about 90g. Prototype 1, which was the larger of the two, produced the maximum power of 349,6 mW and the average continuous power of 139,7 mW. The smaller one of the prototypes, prototype 2, produced the maximum power of 212,4 mW and the average continuous power of 76,46 mW. The amount of the power each of these prototypes produce should be enough to satisfy the need of a low-power sensor node.

ALKUSANAT

Diplomityö tehtiin osana Clean Energy from Environment with Energy Harvesting -projektia, jonka parissa vuosi vierähti nopeasti. Projektin puitteissa opin ja sain paljon uutta tietoa energian keräämisestä. Matkan varrella koettiin paljon kaikenlaista, eikä vastoin käymisiltäkään täysin välttytty. Tehdystä työstä ja kaikista kokemuksista jäi kuitenkin erittäin positiivinen ja onnistunut mielikuva, jonka avulla on hyvä suunnata eteenpäin.

Diplomityön osalta haluan kiittää TTY:n elektroniikan ja tietoliikennetekniikan laboratorion tutkimuspäällikkö Pekka Ruuskasta mahdollisuudesta tämän diplomityön tekemiseen sekä sen ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Kiitos kuuluu myös VTT:n Henrik Huovialle kaikesta avusta ja antoisista keskusteluista, joita diplomityön yhteydessä kävimme. Tärkeimpänä tukijanani ja kannustajanani, haluan myös kiittää perhettäni ja läheisiäni kaikesta siitä henkisestä voimavarasta, jota loitte minulle tämän diplomityön aikana.

Tampereella, 20.11.2018

Jarkko Välitälo

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	INDUKTIIVISEN KERÄIMEN LINEAARINEN TOIMINTAPERIAATE.....	5
2.1	Siirtofunktio	6
2.2	Sähköinen vastinkytkentä.....	6
2.3	Vaimennus.....	7
2.4	Teho.....	8
2.5	Induktiivinen generaattori	10
3.	INDUKTIIVISIEN KERÄIMIEN SUORITUSKYVYN KASVATTAMINEN ...	14
3.1	Lineaariset menetelmät	15
3.1.1	Ulkoisen värähtelyn vahvistaminen.....	15
3.1.2	Keräimen resonanssitaajuuden säätäminen.....	17
3.1.3	Usean värähtelijän yhdistelmä	17
3.1.4	Hybridikeräimet	18
3.2	Epälineaariset menetelmät.....	19
3.2.1	Epälineaariset jouset	20
3.2.2	Aksiaalinen kuormitus	22
3.2.3	Bistabiilisuus	23
3.2.4	Värähtelijän amplitudin rajoittaminen	24
3.2.5	Värähtelyn kiihdyttäminen massan avulla	26
4.	INDUKTIIVISIEN KERÄIMIEN SUORITUSKYVYN MITTAAMINEN	27
4.1	Tehotiheys	27
4.2	Tehokkuus	28
4.3	Tilavuuden ja kaistanleveyden hyvyysluvut	30
5.	MITTAUSJÄRJESTELYT	33
6.	PROTOTYYPPIKERÄIMET	35
7.	MITTAUSTULOKSET	38
7.1	Mekaaninen värähtely	38
7.2	Prototyyppikeräin 1	39
7.3	Prototyyppikeräin 2	41
7.4	Suorituskyky.....	43
8.	YHTEENVETO	45
	LÄHTEET	48

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Lohkokaavio energian keräämiseen tarvittavista komponenteista. [4].....</i>	<i>3</i>
Kuva 2.	<i>Värähtelystä energiaa hyötykäyttöön tuottavan keräimen geneerinen malli, jonka avulla induktiivisesti toimivia keräimiä mallinnetaan. Massan värähtelyyn vaikuttavat vaimennus b, jousen jousivakio k, kotelon liike $y(t)$, massan liike $x(t)$ sekä massan ja kotelon suhteellinen liike $z(t)$. [6].....</i>	<i>5</i>
Kuva 3.	<i>Lineaarisesti toimivan induktiivisen keräimen sähköinen vastinkytkentä [6].....</i>	<i>7</i>
Kuva 4.	<i>Hyvyyshuvun suuruus vaikuttaa lineaarisesti toimivan induktiivisen keräimen tuottaman tehon maksimiarvoon sekä keräimen kaistanleveyteen [6].....</i>	<i>10</i>
Kuva 5.	<i>Induktiivisen generaattorin toimintaperiaatteet. Kuvassa a) magneettikentän voimakkuus pysyy vakiona, mutta magneetit ja kela liikkuvat suhteessa toisiinsa, jolloin kelan läpäisevä magneettivuo muuttuu. Kuvassa b) kela ja magneetti liikkuvat suhteessa toisiinsa, jolloin magneettikentän voimakkuus muuttuu etäisyyden kasvaessa. Muutoksen myötä myös kelan läpäisevä magneettivuo muuttuu. [6]</i>	<i>11</i>
Kuva 6.	<i>Induktiivisen generaattorin sähköinen vastinkytkentä [6].</i>	<i>12</i>
Kuva 7.	<i>Ulkoisen värähtelyn amplitudia kasvattavan mekaanisen vahvistimen rakenne ylä- (ylhäällä) ja sivuprofiilista (alhaalla) katsottuna [7].</i>	<i>16</i>
Kuva 8.	<i>Kaksoisvärähtelijään perustuva induktiivinen keräin, jossa keräimen kela ja magneetti molemmat värähtelevät palkkien vaikutuksesta [10].</i>	<i>18</i>
Kuva 9.	<i>Induktiivista ja pietsosähköistä energianmuunnostekniikkaa yhdistelevä hybridikeräin [12].</i>	<i>19</i>
Kuva 10.	<i>Keräimen sisällä levitoivan magneetin nopeus taajuuspyyhkäisyssä. Kuvassa a) ulkoisen värähtelyn voimakkuus ei riitä aktivoimaan magneettisen jousen epälineaarisuutta. Kuvassa b) jousen epälineaarisuus on aktivoitunut. Punaiset pisteet kuvaavat taajuuksissa ylöspäin ja vihreät ympyrät alaspäin pyyhkäisyä. Musta käyrä kuvaa Duffing'n yhtälöillä laskettua teoreettista mallia (yhtenäinen viiva kuvaa stabiilia ja katkoviiva epästabiilia arvoa). [15]</i>	<i>21</i>
Kuva 11.	<i>Keräimen resonanssitajuuuden säätömekanismi, jossa palkin jännitystä voidaan säätää kestopagneettien vetovoiman avulla [16].....</i>	<i>22</i>

Kuva 12.	<i>Bistabiilin keräimen jousisysteemin potentiaalienergia. Kuvaajaan muodostuu kolme tasapainotilaa, joista kaksi ovat stabiileja ja yksi on epästabiili. Katkoviivalla on esitetty systeemin potentiaalienergia, kun systeemissä on käytetty löysempiä jousia. Pisteillä esitetty kuvaaja vastaa identtistä systeemiä, mutta jäykemmällä jousilla. [18]</i>	<i>23</i>
Kuva 13.	<i>Mekaanisten rajoittimien etäisyyden vaikutus keräimen kaistanleveyden suuruuteen. Musta käyrä esittää kaistanleveyden alataajuuden ja on sama kaikilla rakenteilla. Punainen käyrä esittää rajoittamattoman perusrakenteen, vihreä käyrä yhden rajoittimen ja sininen käyrä kahden rajoittimen rakenteen taajuuskaistan ylätaajuuden. [20]</i>	<i>25</i>
Kuva 14.	<i>Rajoittamattoman (musta käyrä) ja yhden rajoittimen rakenteen (punainen ja sininen käyrä) vaikutus keräimen jännitespektriin. Punaisella on esitetty simulointimallista saatu ja sinisellä prototyypistä mitattu jännitespektri. [20]</i>	<i>25</i>
Kuva 15.	<i>Mittausjärjestelyjen lohkokaavio.</i>	<i>33</i>
Kuva 16.	<i>Ulkoisena värähtelylähteenä mittauksissa käytettiin rakenteellisesti muokattua bassokaiutinelementtiä.</i>	<i>34</i>
Kuva 17.	<i>Prototyypikeräin 2 avattuna. Keräimien rakenne koostuu 8:stä osasta, jotka vasemmalta oikealle ovat: runko, kela, päätypalat, jousien kiinnikkeet, jouset, magneetit, välikappale ja päätypalojen suljin.</i>	<i>35</i>
Kuva 18.	<i>Bassokaiutinelementin tuottaman värähtelyn ominaisuudet neljällä eri funktiogeneraattorin ohjausjännitteellä. Kuvassa a) on prototyypikeräimen etäisyys siirtymäanturista taajuuden funktiona. Kuvassa b) on siirtymäanturin datasta lasketut mekaanisen värähtelyn kiihtyvyyden huippuarvot taajuuden funktiona.</i>	<i>38</i>
Kuva 19.	<i>Prototyypikeräin 1:n taajuuspyyhkäisymittauksien data. Vasemmassa sarakkeessa on esitetty kuormavastuksen ($R_L = 100 \Omega$) yli indusoitunut jännite taajuuden funktiona kolmella eri jousivakion jousilla. Oikeassa sarakkeessa on esitetty kuormavastukseen siirtynyt teho taajuuden funktiona. Mittaukset on toistettu neljällä eri funktiogeneraattorin ohjausjännitteellä.</i>	<i>40</i>
Kuva 20.	<i>Prototyypikeräin 2:n taajuuspyyhkäisymittauksien data. Vasemmassa sarakkeessa on esitetty kuormavastuksen ($R_L = 100 \Omega$) yli indusoitunut jännite kahdella eri jousivakion jousilla. Oikeassa sarakkeessa on esitetty kuormavastukseen siirtynyt teho. Mittaukset on toistettu neljällä eri funktiogeneraattorin ohjausjännitteellä.</i>	<i>42</i>

Kuva 21.	<i>Kuormavastukseen siirtyneet hetkelliset tehot kaiutinelementin värähtelyn ollessa voimakkainta. Kuvassa a) prototyyppikeräimen 1:n ja kuvassa b) prototyyppikeräimen 2:n tulokset.....</i>	<i>43</i>
-----------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EMF	engl. Electromotive Force, sähkömotorinen voima
FoM _{BW}	engl. bandwidth Figure of Merit, kaistanleveyden hyvyysluku
FoM _V	engl. volume Figure of Merit, tilavuuden hyvyysluku
IoT	engl. Internet of Things, esineiden internet
NPD	engl. Normalized Power Density, normalisoitu tehotiheys
PC	engl. Personal Computer, henkilökohtainen tietokone
PD	engl. Power Density, tehotiheys
PLA	engl. Polylactide, 3D-tulostamiseen käytetty muovi
PTFE	engl. Polytetrafluoroethylene, teflon-muovi
RMS	engl. Root Mean Square, tehollisarvo

a	kiihtyvyys
B	magneettivuon tiheys
b	vaimennus
b_e	sähköinen vaimennus
b_m	mekaaninen vaimennus
C	kapasitanssi
E	jännite
e	tehokkuus
f_r	resonanssitaajuus
I	sähkövirta
i	sähkövirta
k	jousivakio
L	induktanssi
L_c	kelan induktanssi
l	kelan leveys
m	massa
N	kelan kierrosten lukumäärä
P	teho
P_e	sähköinen teho
P_m	mekaaninen teho
Q	hyvyysluku
Q_e	energian muuntumisen hyvyysluku
Q_{oc}	avoimen piirin hyvyysluku
R	resistanssi
R_c	kelanresistanssi
R_L	kuormaresistanssi
S	kelan poikkipinta-ala
t	aika
V	tilavuus
x	massan sijainti
Y	ulkoisen värähtelyn amplitudi
y	kotelon sijainti
Z_l	magneetin liikkeen maksimi amplitudi
z	kotelon ja massan välinen etäisyys

$\delta\omega_{1\text{ dB}}$	1 dB:n taajuuskaistan leveys
ζ_e	sähköinen vaimennuskerroin
ζ_m	mekaaninen vaimennuskerroin
ζ_T	kokonaisvaimennuskerroin
θ	kulma
κ	sähkömagneettinen kytkeytymiskerroin
λ	tehon siirtymiskerroin
ρ	tiheys
φ	vaihekulma
ω	kulmataajuus
ω_r	resonanssikulmataajuus

1. JOHDANTO

Energian keräämisen periaatteita on hyödynnetty historian saatossa tuulimyllyjen ja vesirattaiden avulla ulkoisten energianlähteiden hyötykäyttöön valjastamiseksi. Turbiinien keksimisen myötä luonnosta valjastetun pyörimisliikkeen avulla voitiin alkaa tuottamaan sähköenergiaa. NykYTEknologian avulla sähköenergiaa voidaan tuottaa suurissa määrissä useasta eri energian lähteestä eri tekniikoilla, joista aurinkoenergia, vesi- ja tuulivoima käyttävät hyödykseen energian keräämisen periaatetta. Aurinkokennoja, vesivoimaloita ja tuulimyllyjä voidaankin pitää suuren mittakaavan energiakeräiminä.

Pienen mittakaavan energiakeräimien ongelmana on ollut niiden tuottaman sähköenergian vähyys, joka ei ole riittänyt sovelluskohteen elektroniikan tarpeisiin. Mobiililaitteiden yleistyttyä kulutuselektroniikassa, tekniikan kehityksessä on yhä voimakkaammin korostunut energiatehokkuus sekä energiankulutuksen minimoiminen. Matalatehoisen elektroniikan kehityksen myötä kiinnostus energian keräämiseen on kasvanut valtavasti, mikä on myös vauhdittanut energian keräämisen teknologioiden tutkimus- ja kehitystyötä.

Kulutuselektroniikassa eräs vallitsevista trendeistä on arjen elektroniikkalaitteiden älyominaisuuksien lisääminen ja elektroniikan tuominen yhä lähemmäksi kuluttajan jokapäiväistä arkielämää. Markkinoilla on saatavilla laaja valikoima erilaisia elektroniikkatuotteita, joilla oman kodin voi muuttaa älykodiksi. Suuri osa näistä tuotteista pohjautuu erilaisiin sensoriverkko- ja IoT-sovelluksiin (engl. Internet of Things), joissa sensoreilta mitattua dataa analysoidaan ja analysoinnin pohjalta tehtyjen päätelmien mukaan ohjataan laitteiston muita osia. Tällainen järjestelmä voi olla esimerkiksi kodin verhojen automaattinen ohjaus, joka säättää verhoja auki ja kiinni ulkona vallitsevan valoisuuden mukaan. Samanlaisiin ideoihin pohjautuvia sovelluksia on paljon saatavilla myös teollisuuden käyttöön. Sovellusten avulla prosesseja voidaan automatisoida tai niiden kannalta tärkeitä parametrejä, kuten lämpötilaa tai vaikka virtausnopeutta, voidaan tarkkailla reaaliaikaisesti.

Älyjärjestelmien laitteiden tärkeimpiä ominaisuuksia on mobiilius, sillä sovelluskohdeesta riippuen laitteiston päätelaitteita voidaan joutua asentamaan hankaliin ja ahtaisiin paikkoihin tai osaksi liikkuvaa työkonetta. Järjestelmät voivat joissakin sovelluksissa kasvaa hyvin laajoiksi ja yksittäisten laitteiden lukumäärä voi olla suuri. Mobiiliuden ja laitteiden suuren määrän myötä järjestelmien haasteeksi nousee laitteiden energiansaanti. Hankalissa ja liikkuvissa asennuspaikoissa laitteille ei usein ole mahdollista saada energiaa sähköverkosta, vaan niille joudutaan asentamaan paikallinen teholähde, kuten akku tai paristot.

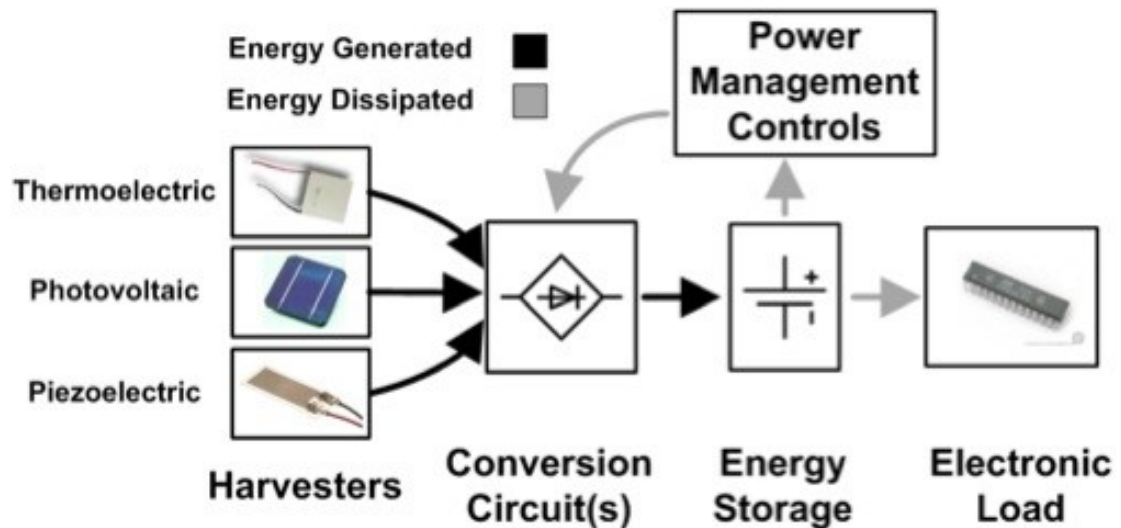
Elektroniikkalaitteiston teholähteen tulee tarjota sille riittävästi sähköenergiaa kasvattamatta kuitenkaan liikaa laitteiston fyysistä kokoa. Akut ja paristot pystyvät säilömään rajallisen määrään sähköenergiaa itseensä ja ne tyhjenevät ajan mittaan. Jotta laitteistoa voidaan pitää jatkuvassa käytössä, tulee akkuja ladata tai paristoja vaihtaa säännöllisin väliajoin. Käytetyt akut ja paristot lisäävät riskiä ympäristön saastumiselle, sillä ne sisältävät ympäristölle haitallisia kemiallisia aineita. Haitallisista aineista huolimatta akkuja voidaan asianmukaisesti kierrättämällä uusiokäyttää. Jatkuva laitteiston ylläpitäminen voi sovelluskohteesta riippuen viedä paljon huoltohenkilöstön aikaa ja aiheuttaa käyttäjälle suuria lisäkustannuksia. Paristojen kulutus on muutenkin nyky-yhteiskunnassa merkittävä ympäristötekijä, sillä pelkästään Euroopan unionin alueelle arvioidaan tuotavan vuosittain noin 1150 tonnia erilaisia akkuja ja paristoja, joista kaikki eivät päädy kierrätyksen kautta hyötykäyttöön [1].

Energian kerääminen tarjoaa ratkaisuja mobiilien laitteiden teholähdeongelmiin. Energian kerääminen on prosessi, jossa sähköenergiaa kerätään talteen akkuun tai superkondensaattoriin laitetta ympäröivästä energianlähteestä. Keräimen fyysisestä koosta, sen hyödyntämästä tekniikasta ja ulkoisesta energianlähteestä riippuen laitteelle voidaan potentiaalisesti kerätä sen kokonaisuudessaan tarvitsema energia, jolloin erillisiä akkuja ja paristoja ei tarvita. Energiaa voidaan kerätä muun muassa liikkeestä sähkömagnetismin avulla, auringon valosta valosähköisen ilmiön avulla, lämpötilaeroista lämpösähköisen ilmiön avulla sekä materiaalien muodonmuutoksesta magnetostriktiivisyyden ja pientosähköisen ilmiön avulla. Vuonna 2017 energian keräämisen markkinoiden arvoksi arvioitiin noin 1,3 miljardia dollaria ja suuren kysynnän takia markkinoiden odotetaan kasvavan vuosittain noin 22 %:lla vuoteen 2024 asti [2].

Energian keräämistä voidaan hyödyntää myös tilanteissa, joissa sovelluskohteessa ei jostakin syystä saada kerättyä kokonaisuudessaan tarvittavaa määrää energia laitteiston käyttöön. Kerättyä energiaa voidaan kuitenkin hyödyntää laitteistoissa myös toissijaisena tehrolähteenä pidentämään akkujen elinikää ja parantamaan laitteiston energiatehokkuutta. Energiatehokkuuden lisäämisen ja pidempien käyttöikien myötä energian kerääminen mahdollistaa potentiaalisia säästöjä suurten elektroniikkalaitteistojen käytössä ja ylläpidossa. Energiatehokkuuden kehittämiseksi ja parantamiseksi luodaan myös poliittista painetta. Euroopan unioni on asettanut itselleen tavoitteen energiatehokkuuden parantamiseksi 20 %:lla vuoteen 2020 mennessä. Tätä tavoitetta on myöhemmin edelleen nostettu ja vuonna 2018 tavoitetta päätettiin vielä nostaa 32,5 %:iin vuoteen 2030 mennessä. [3]

Energian kerääminen tapahtuu tavallisesti järjestelmällä, joka koostuu neljästä komponentista. Tärkein osa järjestelmää on keräin. Keräin toimii energiamuuntimena muuntamalla ympäristöstä kerättävän ulkoisen energian sähköenergiaksi. Keräimessä voidaan hyödyntää useaa eri tekniikkaa riippuen ulkoisesta energianlähteestä. Jotta keräimen tuotama vaihtojännite voidaan hyödyntää, tulee se muuntaa elektroniikalle sopivaksi. Yksin-

kertaisimmillaan keräimen jälkeen tuleva muunnospiiri voi koostua diodeilla tehdystä tasasuuntaussillalla. Muunnospiirin jälkeen sähköenergia varastoidaan joko superkondensaattoriin tai akkuun. Varastoitua energiaa voidaan hyödyntää sekä muunnospiirin toiminnan ohjaamiseen ja optimoimiseen energiasäilön varaustilanteen mukaan että sähköiseen kuormaan syöttämiseen. Energian keräämiseen tarvittavan järjestelmän lohkokaavio on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Lohkokaavio energian keräämiseen tarvittavista komponenteista. [4]

Tämä diplomityö keskittyy energian keräämiseen mekaanisesta värähtelystä induktiivisilla menetelmillä. Sähkömagneettinen induktio on ilmiönä hyvin tunnettu eikä se vaadi monimutkaisia tai kalliita rakenteita, minkä takia sitä on helppo hyödyntää energian keräämisessä. Energian keräämiseen tarvittavan järjestelmän osalta diplomityössä keskitytään ainoastaan keräimeen ja sen liikkeestä muuntaman energian määrään. Ulkoiseksi energiaksi on valittu mekaaninen värähtely, sillä sitä esiintyy koneiden vaikutuksesta lukuisissa eri tilanteissa niin arkielämässä kuin teollisuuden prosesseissa.

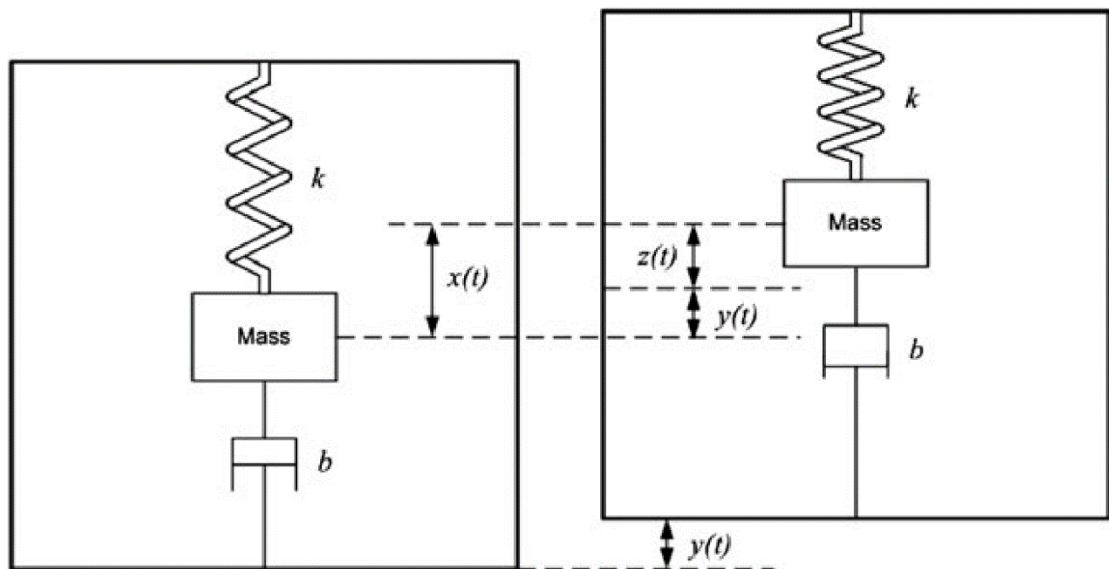
Diplomityö koostuu kirjallisesta ja kokeellisesta osasta. Kirjallisessa osassa keskitytään induktiivisen keräimen matemaattiseen mallintamiseen sekä kirjallisuudessa esitettyihin menetelmiin, joilla keräimen suorituskykyä voidaan parantaa. Tämän lisäksi osuudessa esitellään myös lyhyesti keräimien tehokkuuksien vertailemiseen ehdotettuja mittasuureita. Kokeellisessa osuudessa rakennetaan kaksi rakenteeltaan yksikertaista lineaarisesti toimivaa prototyypikeräintä. Keräimiä tutkimalla ja mittaamalla on tarkoitus arvioida induktiivisen menetelmän soveltuvuutta energian keräämiseen käytännön sovel-luskohteessa. Kriittisimpänä asiana tulee selvittää, voidaanko induktiivinen keräin mi-niatyrisoida järkevään kokoon siten, että se vielä kerää talteen riittävän määrän energiaa elektroniikan toimintaa varten.

Diplomityön sisältö on jaoteltu lukuihin seuraavasti: Luvussa 2 esitetään lineaarisesti toimivan induktiivisen keräimen matemaattinen malli ja johdetaan yhtälö keräimen indusoidulle jännitteelle. Luvussa 3 tehdään lyhyt katsaus kirjallisuudessa esitettyihin lineaariin ja epälineaarisiin metodeihin, joilla induktiivisen keräimen suorituskkyä voidaan kasvattaa. Luvussa 4 käydään läpi muutamia kirjallisuudessa esitettyjä mittasuureita induktiivisten keräimien hyvyyden mittaamiseen. Luvussa 5 esitellään diplomityön mittauksissa käytetty mittausjärjestely. Luvussa 6 esitellään diplomityössä rakennetut prototyyppikeräimet sekä niiden rakennusprosessi. Luvussa 7 esitetään mittauksista kerätty data ja luvussa 8 on diplomityön yhteenveto.

2. INDUKTIIVISEN KERÄIMEN LINEAARINEN TOIMINTAPERIAATE

Rakenteellisesti yksinkertainen, lineaarisesti toimiva ja kineettistä energiaa talteen keräävä, induktiivinen keräin koostuu kotelosta, värähtelijästä (jousen ja kestopäätteen yhdistelmä) ja kelasta. Tähän yksinkertaiseen rakenteeseen pohjautuen Williams ja Yates esittelivät geneerisen matemaattisen mallin induktiiviselle keräimelle vuonna 1996 [5]. Tätä kuvassa 2 esitettyä mallia, joka koostuu jousella koteloon kiinnitetystä massasta ja vaimentimesta, käytetään yleisesti lineaaristen keräimien mallintamiseen.

Kotelon värähdellessä ulkoisen voiman vaikutuksesta, myös kotelon sisällä oleva massa m alkaa värähtelemään jousen varassa. Massan värähtely aiheutuu jousen palauttavasta voimasta, jonka suuruutta kuvaa jousen jousivakio k . Kotelon ja massan värähtelyä kuvassa 2 kuvaavat poikkeamat $y(t)$ ja $x(t)$. Nämä värähtelyt tapahtuvat toisiinsa nähden epätahdissa, jolloin kotelon ja massan välille syntyy suhteellista liikettä $z(t)$. Mallin analysoimisen helpottamiseksi oletetaan kotelon värähtelyyn saattavan ulkoisen voiman värähtelevän sinimuotoisesti. Tällöin ulkoinen värähtely voidaan mallintaa yhtälön $y(t) = Y \sin(\omega t)$ mukaan, jossa Y on värähtelyn amplitudi ja ω on kulmataajuus. Kuvan 2 parametri b kuvastaa värähtelevän massan kokema vaimennusta, joka koostuu systeemin mekaanisesta b_m ja sähköisestä vaimenemisesta b_e ($b = b_m + b_e$). [6]



Kuva 2. Värähtelystä energiaa hyötykäyttöön tuottavan keräimen geneerinen malli, jonka avulla induktiivisesti toimivia keräimiä mallinnetaan. Massan värähtelyyn vaikuttavat vaimennus b , jousen jousivakio k , kotelon liike $y(t)$, massan liike $x(t)$ sekä massan ja kotelon suhteellinen liike $z(t)$. [6]

2.1 Siirtofunktio

Induktiivisen keräimen analysoimista varten mallissa olevan kotelon oletetaan olevan kiinnitetty ulkoiseen värähtelylähteeseen, joka on massaltaan paljon suurempi kuin jouseen kiinnitetty värähtelevä massa. Värähtelylähteen suuren massan ansiosta keräimen sisällä liikkuva pienempi massa ei vaikuta ulkoiseen värähtelylähteeseen, jolloin pienemmän massan liike suhteessa koteloon voidaan laskea differentiaaliyhtälön avulla seuraavasti [6]:

$$m \cdot \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + b \cdot \frac{dz(t)}{dt} + k \cdot z(t) = -m \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2}, \quad (1)$$

jossa $\frac{dz(t)}{dt}$ kuvaa massan ja kotelon välisen suhteellisen liikkeen nopeuden, $\frac{d^2 z(t)}{dt^2}$ suhteellisen liikkeen kiihtyvyyden ja $\frac{d^2 y(t)}{dt^2}$ kotelon ja ulkoisen värähtelyn kiihtyvyyden.

Yhtälölle (1) voidaan tehdä Laplace-muunnos, jonka jälkeen se voidaan kirjoittaa muotoon [6]:

$$m \cdot s^2 \cdot z(s) + b \cdot s \cdot z(s) + k \cdot z(s) = -m \cdot a(s), \quad (2)$$

jossa $a(s)$ on Laplace-muunnos kotelon ja ulkoisen värähtelyn kiihtyvyydelle.

Yhtälöstä (2) voidaan johtaa induktiivisen keräimen siirtofunktio [6]:

$$\frac{z(s)}{a(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} = \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_r}{Q}s + \omega_r^2}, \quad (3)$$

jossa Q on keräimen hyvyysluku ($Q = \frac{\sqrt{km}}{b}$) ja ω_r keräimen resonanssikulmataajuus ($\omega_r = \sqrt{\frac{k}{m}}$).

2.2 Sähköinen vastinkytkentä

Induktiivisen keräimen mallin yhtälön (3) siirtofunktio voidaan uudelleen muotoilla muotoon [6]:

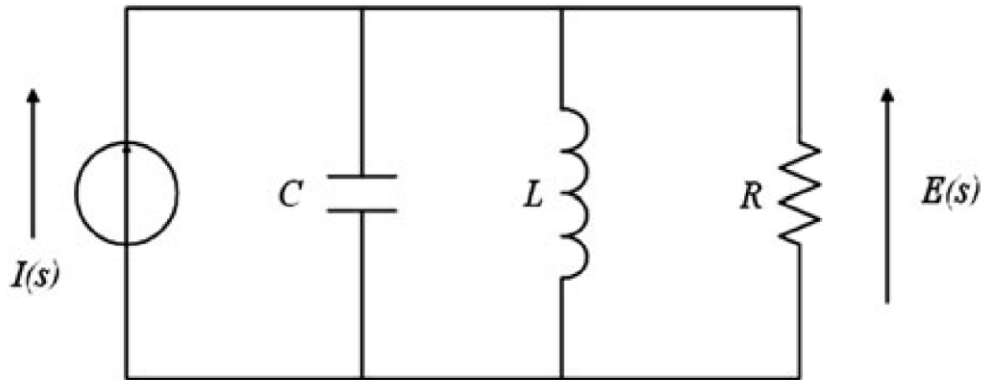
$$-m \cdot a(s) = s \cdot Z(s) \left(ms + b + \frac{k}{s} \right) \quad (4)$$

Yhtälö (4) voidaan uudelleen kirjoittaa Ohmin lakia muistuttavaan muotoon, josta mallin sähköinen vastinkytkentä voidaan tulkita [6]:

$$-I(s) = E(s) \left(sC + \frac{1}{R} + \frac{1}{sL} \right), \quad (5)$$

jossa $I(s) = m \cdot a(s)$, $E(s) = s \cdot Z(s)$, $C = m$, $R = \frac{1}{b}$ ja $L = \frac{1}{k}$.

Yhtälön (5) jännite $E(s)$ kuvastaa Faradayn induktiolain mukaista, kestopagneetin liik-
keestä aiheutuvan muuttuvan magneettivuon käämiin indusoimaa jännitettä. Indusoitunut
jännite synnyttää virtapiiriin sähkövirran $I(s)$, joka suunnaltaan Lenzin lain mukaan vas-
tustaa magneettikentän muutosta. Yhtälön (5) oikealla puolella oleva sulkulauseke ku-
vastaa puolestaan virtapiirin impedanssin käänteisarvoa. Vaimennustermi b , joka kuluttaa
kineettistä energiaa, mallinnetaan resistanssina R . Jousen varassa roikkuvaan massa-
an m varastoituu potentiaalienergiaa sen liikkuaessa ylöspäin. Varastoitunut potentiaalienergia
muuttuu taas kineettiseksi energiaksi massan liikkuaessa alaspäin. Massan voidaan ajatella
toimivan kondensaattorina C , jota vuorotellen ladataan ja puretaan varauksesta. Jousiva-
kio k kuvaa jousen palauttavaa voimaa, jonka suuruus voidaan laskea Hooken lain mu-
kaan. Toisin sanoen jousi vastustaa tasapainosta poikkeuttavaa voimaa. Jousivakion vai-
kutusta voidaan mallintaa virtapiiriin kelana L , joka vastustaa virran muutoksia. Tällöin
yhtälön (5) mukaan yksinkertaista lineaarista keräintä voidaan mallintaa kuvan 3 mukai-
sella rinnakkaisresonanssipiirillä [6].



Kuva 3. Lineaarisesti toimivan induktiivisen keräimen sähköinen vastinkytkeä [6].

2.3 Vaimennus

Induktiivisen keräimen mallissa tapahtuvaa vaimennusta voidaan mallintaa vaimennus-
kertoimien ζ_T , ζ_m ja ζ_e avulla seuraavasti [6]:

$$\zeta_T = \frac{b}{2m\omega_r} = \frac{b_m + b_e}{2m\omega_r} = \zeta_m + \zeta_e, \quad (6)$$

jossa alaindeksit T , m ja e viittaavat kokonais-, mekaaniseen sekä sähköiseen vaimennuk-
seen.

Keräimen hyvyysluku Q on sitä suurempi, mitä paremmin värähtelijä oskilloi keräimen sisällä. Toisin sanoen hyvyysluku Q on kääntäen verrannollinen kokonaisvaimennuskerrotimeen ζ_T [6]:

$$Q = \frac{1}{2\zeta_T} \quad (7)$$

Hyvyysluvusta Q voidaan erotella erikseen mekaanisen ja sähköisen vaimennuksen vaikutus[6]:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{oc}} + \frac{1}{Q_e}, \quad (8)$$

jossa Q_{oc} on avoimen piirin hyvyysluku, joka myötäilee värähtelijän kokemaa mekaanista vaimennusta. Q_e kuvastaa keräimessä tapahtuvaa energian muuntamisen hyvyyttä, jota ei voida suoraan mitata. Yhtälön (8) avulla energiamuunnoksen hyvyys voidaan laskea, kun avoimen piirin hyvyysluku ja keräimen hyvyysluku on mitattu.

2.4 Teho

Induktiivisen keräimen mallissa vaikuttavan ulkoisen värähtelyn $y(t)$ ollessa sinimuotoista, voidaan mallin differentiaalinen yhtälö (1) ratkaista massan ja kotelon suhteellisen liikkeen $z(t)$ suhteen [6]:

$$z(t) = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2}} \cdot Y \sin(\omega t + \varphi), \quad (9)$$

jossa vaihekulma φ on muotoa:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{b\omega}{k - \omega^2 m} \right) \quad (10)$$

Mallissa tapahtuva keskimääräinen vaimeneva teho, joka koostuu muunnetun energian ja mekaanisten häviöiden summasta, voidaan laskea seuraavasti [6]:

$$P = b \left(\frac{dz(t)}{dt} \right)^2 \quad (11)$$

Yhtälöt (9) ja (11) yhdistämällä voidaan laskea mallin keskimääräinen vaimeneva teho kulmataajuuden funktiona [6]:

$$P(\omega) = \frac{m\zeta_T Y^2 \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^3 \omega^3}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta_T \frac{\omega}{\omega_r}\right)^2} \quad (12)$$

Yhtälön (12) mukaan keräimen sisällä värähtelevän massan taajuuden vastatessa ulkoisen värähtelyn taajuutta ($\omega = \omega_r$) keräimessä häviävä teho saavuttaa maksimiarvonsa ja yhtälö voidaan supistaa muotoon:

$$P = \frac{mY^2 \omega_r^3}{4\zeta_T} \quad (13)$$

Keräimen värähdellessä tehoa häviää mekaanisen vaimennuksen (P_m) vaikutuksesta sekä kineettisen energian sähköenergiaksi muuntumisen takia (P_e). Näille molemmille voidaan kirjoittaa omat yhtälönsä [6]:

$$P_e = \frac{\zeta_e m Y^2 \omega_r^3}{4(\zeta_m + \zeta_e)} \quad (14)$$

$$P_m = \frac{\zeta_m m Y^2 \omega_r^3}{4(\zeta_m + \zeta_e)} \quad (15)$$

Yhtälön (14) mukaan suurin määrä energiaa saadaan muunnettua kineettisestä energiasta sähköenergiaksi, kun mekaaninen ja sähköinen vaimennus ovat keräimessä yhtä suuria ($\zeta_e = \zeta_m$). Tällöin keräimen tuottama maksimaalinen teho on puolet koko keräimen värähtelytehosta [6]:

$$P_e = \frac{P}{2} = \frac{mY^2 \omega_r^3}{16\zeta_m} \quad (16)$$

Ulkoisen sinimuotoisen värähtelyn kiihtyvyyden huippuarvo a on muotoa $a = Y\omega^2$, jolloin yhtälö (16) voidaan kirjoittaa muotoon [6]:

$$P_e = \frac{ma^2}{16\omega_r \cdot \zeta_m} \quad (17)$$

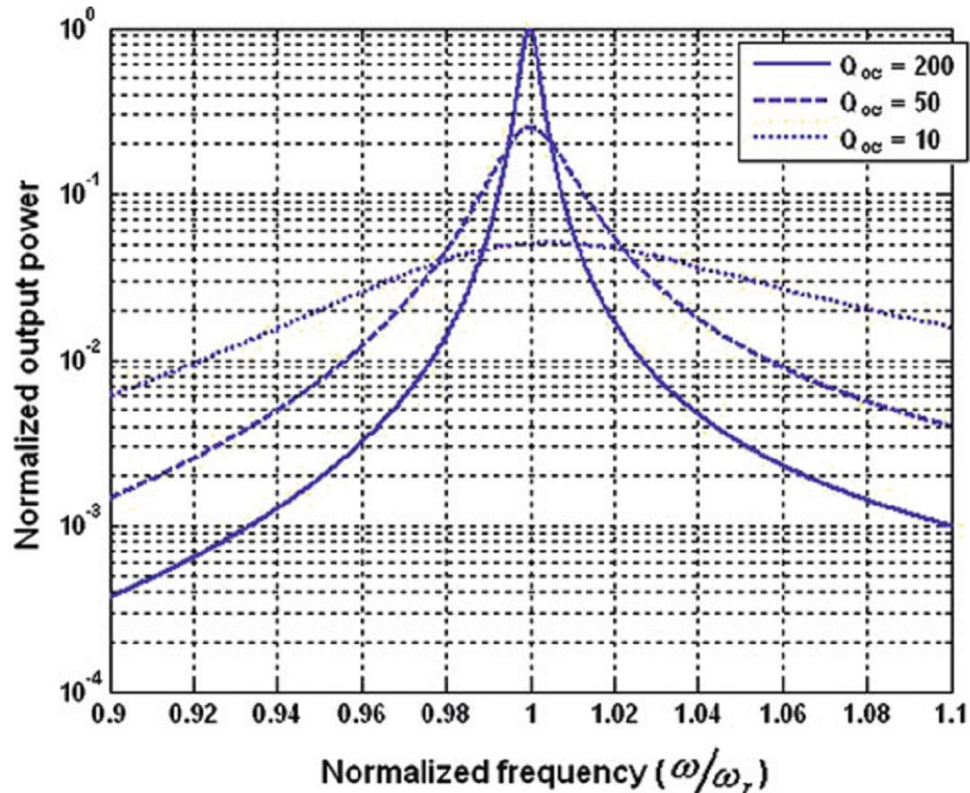
Keräimen avoimen piirin hyvyysluku Q_{OC} on muotoa $Q_{OC} = \frac{1}{2\zeta_m}$, jolloin yhtälö (17) voidaan kirjoittaa sen avulla uudelleen muotoon [6]:

$$P_e = \frac{ma^2}{8\omega_r} \cdot Q_{OC} \quad (18)$$

Lineaarisesti toimivan induktiivisen keräimen resonanssitaajuudellaan tuottamaan maksimaaliseen tehoon vaikuttavat värähtelyn taajuus ja kiihtyvyys sekä keräimen värähtelijän massa ja keräimen hyvyys värähtelijänä. Näin ollen rajoitteet induktiivisen keräimen

tuottaman tehon suuruudelle asettuvat ulkoisen värähtelyn ominaisuuksien sekä keräimen kokoon liittyvien fyysisten rajoitteiden, kuten koon ja painon, mukaan.

Kuvassa 4 on esitetty mallin avulla lasketut tehot kolmelle eri hyvyysluvun lineaarisesti toimivalle induktiiviselle keräimelle. Kuvasta 4 nähdään keräimen hyvyysluvun vaikutus tuotetun tehon maksimiarvoon sekä keräimen taajuuskaistan leveyteen. Mitä parempi keräimen hyvyysluku on, sitä suurempi teho saadaan kerättyä talteen, mutta aina vain kapeammalta taajuuskaistalta.

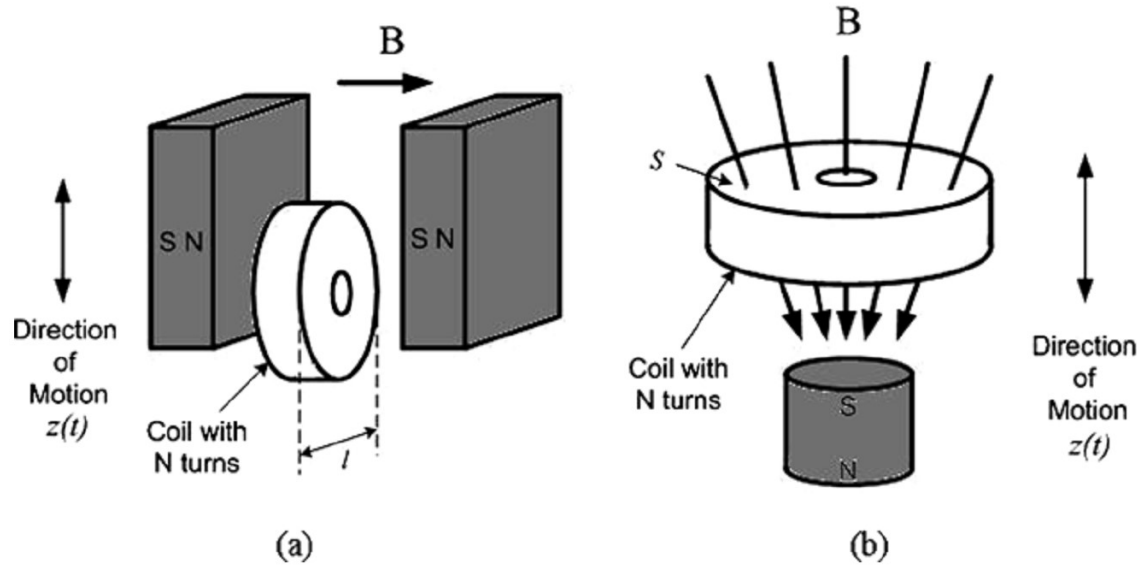


Kuva 4. Hyvyysluvun suuruus vaikuttaa lineaarisesti toimivan induktiivisen keräimen tuottaman tehon maksimiarvoon sekä keräimen kaistanleveyteen [6].

2.5 Induktiivinen generaattori

Induktiivisten keräimien energian muuntamisessa kineettisestä energiasta sähköenergiaksi hyödynnetään massan ja kotelon välistä suhteellista liikettä sekä sähkömagneettista induktiota, jonka Michael Faraday keksi jo vuonna 1831. Faradayn induktiolain mukaan virtasilmukkaan, jonka läpi kulkeva magneettivuo muuttuu, indusoituu jännite. Jännite indusoituu silmukkaan niin magneettikentän voimakkuuden (kuva 5b) kuin virtapiirin silmukka-alan muutoksen johdosta (kuva 5a). Induktiivisten keräimien magneettikenttä luodaan tavallisesti kestopagneeteilla ja kelan käämitys toimii virtasilmukkana, jonka läpi magneettivuo ohjataan. Sähkömagneettisen induktion ansiosta induktiivinen keräin voidaan rakeenteellisesti suunnitella siten, että kestopagneetit liikkuvat ja kela on staattinen tai päinvastoin. Molempien komponenttien on myös mahdollista liikkua, mutta liikkeet

eivät saa tapahtua samassa tahdissa, jotta suhteellista liikettä kelan ja magneettien välille syntyy ja jännite indusoituu. [6]



Kuva 5. Induktiivisen generaattorin toimintaperiaatteet. Kuvassa a) magneettikentän voimakkuus pysyy vakiona, mutta magneetit ja kela liikkuvat suhteessa toisiinsa, jolloin kelan läpäisevä magneettivuomuuhtuu. Kuvassa b) kela ja magneetti liikkuvat suhteessa toisiinsa, jolloin magneettikentän voimakkuus muuttuu etäisyyden kasvaessa. Muutoksen myötä myös kelan läpäisevä magneettivuomuuhtuu. [6]

Kuvan 5a kaltaisessa rakenteessa magneettikenttä on tasainen, mutta kelan ja magneettien välisen suhteellisen liikkeen takia kelan rajaama alue magneettikentästä liikkuu. Tällöin kelan läpäisevä magneettivuomuuhtuu ja sähkömagneettisen induktion synnyttämä sähkömotorinen voima (engl. EMF, Electromotive Force) saadaan yhtälöstä [6]:

$$EMF = -N \cdot l \cdot B \cdot \frac{dz}{dt}, \quad (19)$$

jossa N on kelan kierrosten lukumäärä, l kelan leveys, B kelan läpi kulkevan magneettivuon tiheys ja $\frac{dz}{dt}$ magneettien ja kelan välinen suhteellinen nopeus.

Kuvan 5b kaltaiselle rakenteelle, jossa magneettikenttä muuttuu etäisyyden funktiona, vastaava indusoitunut sähkömotorinen voima voidaan kirjoittaa muotoon [6]:

$$EMF = -N \cdot S \cdot \frac{dB}{dz} \cdot \frac{dz}{dt}, \quad (20)$$

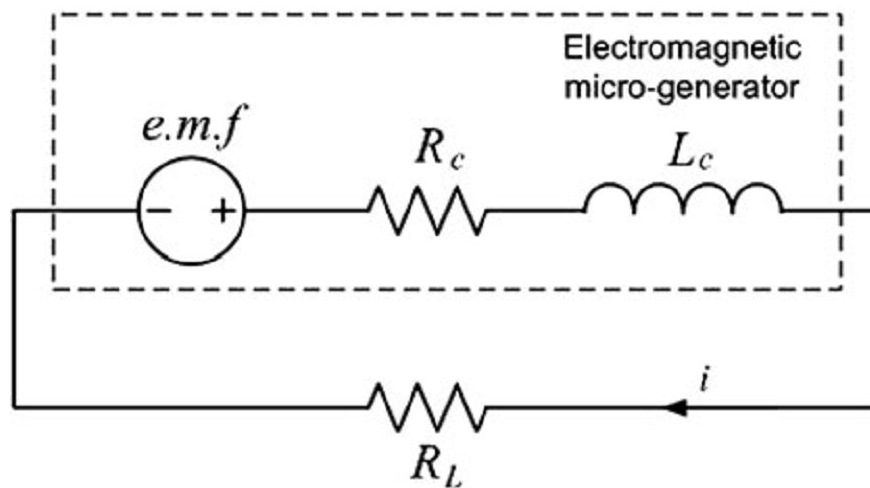
jossa S on kelan poikkipinta-ala ja $\frac{dB}{dz}$ magneettivuon tiheyden gradientti suhteellisen liikkeen suunnassa.

Molemmissa yllä esitetyissä tapauksissa indusoitunut sähkömotorisen voima on riippuvainen suhteellisen liikkeen $z(t)$ nopeudesta. Yhtälöt (19) ja (20) voidaan kirjoittaa näin ollen yleisessä muodossa [6]:

$$EMF = \kappa \cdot \frac{dz}{dt}, \quad (21)$$

jossa κ on sähkömagneettisen kytkeytymisen kerroin, joka riippuu systeemin rakenteesta. Kuvan 5a kaltaisessa tapauksessa $\kappa = -N \cdot l \cdot B$ ja kuvan 5b $\kappa = -N \cdot S \cdot \frac{dB}{dz}$.

Kuvassa 6 on esitetty induktiivisen generaattorin sähköinen vastinkytkentä, jonka kanssa samaan virtapiiriin on kytketty sähköistä kuormaa kuvaava resistanssi R_L . Vastinkytkentä koostuu sähkömagneettisen induktion synnyttämästä sähkömotorisesta voimasta sekä kelan resistanssista R_c ja induktanssista L_c .



Kuva 6. Induktiivisen generaattorin sähköinen vastinkytkentä [6].

Sähkömagneettisesta kytkeytymisestä aiheutuva sähköinen vaimennus b_e on muotoa [6]:

$$b_e = \frac{\kappa^2}{R_L + R_c + j\omega L_c}, \quad (22)$$

jossa R_L on keräimeen kytketty resistiivinen kuorma, R_c ja L_c ovat kelan resistanssi ja induktanssi.

Yhtälön (18) mukaan induktiivisen keräimen tuottama teho on kääntäen verrannollinen sen resonanssitaajuuteen. Tuotetun tehon maksimoimiseksi keräin tulisi aina asettaa toimimaan sen alhaisimmalla resonanssitaajuudella. Tällöin yhtälön (22) jakajassa olevan kelan impedanssin resistiivisen osuuden voidaan olettaa olevan dominoivampi tekijä ja yhtälö voidaan approksimoida muotoon [6]:

$$b_e = \frac{\kappa^2}{R_L + R_c} \quad (23)$$

Sähköinen vaimennuskerroin ζ_e voidaan kirjoittaa yhtälön (23) avulla uudelleen muotoon [6]:

$$\zeta_e = \frac{\kappa^2}{2m\omega(R_L + R_c)} \quad (24)$$

Yhtälö (24) osoittaa, että sähköinen vaimennus b_e voidaan säätää ja optimoida kuormaresistanssin ja kelan resistanssin avulla vastamaan keräimessä tapahtuvaa mekaanista vaimennusta b_m . Yhtälön (14) mukaan tasapainottamalla vaimennukset keskenään saadaan maksimoitua induktiivisen keräimen tuottama teho. Kun keräimen ominaisuudet tunnetaan, voidaan optimaalinen kuormaresistanssi laskea seuraavan yhtälön mukaan [6]:

$$R_L = R_c + \frac{\kappa^2}{b_m} \quad (25)$$

Keräimen tuottama teho voidaan myös kirjoittaa kuormaresistanssin avulla muotoon [6]:

$$P_e = \frac{ma^2}{16\zeta_m\omega_r(1 - \frac{R_c}{R_L})} \quad (26)$$

Yhtälön (26) mukaan sähköiseen kuormaan tuotettuun tehoon vaikuttaa keräimen kelan resistanssin sovittaminen kuormaresistanssin suuruuteen. Keräimen tuottama teho maksimoituu, kun resistanssit saadaan samansuuruisiksi.

3. INDUKTIIVISIEN KERÄIMIEN SUORITUSKY- VYN KASVATTAMINEN

Käytännön sovelluskohteissa induktiivisten keräimien haasteeksi on muodostunut sovelluskohteen asettamat rajoitukset keräimen fyysiselle koolle. Induktiivisen keräimen tuottama teho putoaa nopeasti keräimen koon pienetessä. Tämän lisäksi talteen kerätyn tehon määrään ja keräimen rakenteeseen vaikuttaa suuresti saatavilla olevan ulkoisen värähtelyn voimakkuus ja sen taajuus. Mitä suurempi koko keräimelle sallitaan ja mitä enemmän ulkoista energiaa on tarjolla, sitä suuremman tehon keräin pystyy ulkoisesta värähtelystä keräämään hyötykäyttöön. Toisaalta keräimen fyysisen koon pienetessä sen käytettävyys paranee ja potentiaalisten käyttökohteiden määrä kasvaa. Kompaktin koon myötä keräin on myös helpompi integroida osaksi elektroniikkajärjestelmää.

Haastetta energian keräämiseen aiheuttaa myös lineaarisesti toimivien keräimien kapeahko taajuuskaista. Ulkoinen värähtely, josta energiaa kerätään talteen, on käytännön sovelluskohteissa harvoin taajuudeltaan vakio tai taajuusspektriltään hyvin kapea. Luovussa 2 esitetyn lineaarisesti toimivan keräimen analyysin mukaan suuren hyvyysluvun keräin tuottaa tehoa optimaalisesti vain resonanssitaajuudellaan ja sen välittömässä läheisyydessä (kuva 4). Mitä kauempana keräimen toimintataajuus on resonanssitaajuudesta, sitä vähemmän tehoa keräin pystyy tuottamaan. Tästä johtuen käytännön sovelluskohteissa lineaarisesti toimiva keräin voi suuren osan toiminta-ajastaan tuottaa tehoa epäideaalisesti, vaikka ulkoisesta värähtelystä voisi teoriassa saada kerättyä paljonkin energiaa.

Taajuuskaistan kapeuteen voidaan hakea ratkaisua keräimen hyvyyslukua muokkamalla. Hyvyyslukua huonontamalla saadaan keräimen tehospektrissä näkyvää kapeaa huippua laajennuttua useammille taajuuksille. Hyvyysluvun huonontaminen voidaan tehdä esimerkiksi värähtelijään vaikuttavan mekaanisen vaimennuksen lisäämisellä. Värähtelijän vaimennuksen lisääminen vaikuttaa kuitenkin samalla myös keräimen tuottaman maksimitehon suuruuteen, kuten kuvassa 4 on esitetty. Tämän epäideaalisen riippuvuussuhteen myötä induktiivisen keräimen kaistanleveys ja sen tuottama maksiteho täyttyy sovittaa aina sovelluskohtaisesti ja saatavilla olevan ulkoisen värähtelyn mukaan, jotta keräimen suorituskyky päästään hyödyntämään optimaalisesti.

Induktiivisten keräimien tutkimuksessa on viime vuodet keskitytty keräiminen miniaturisoimiseen, taajuuskaistan kasvattamiseen ja tuotetun tehon maksimoimiseen. Näihin teemoihin liittyen on kirjallisuudessa esitetty useita ratkaisuja, joilla keräimen tuottamaa tehoa ja sen taajuuskaistaa voidaan kasvattaa. Usein keräimen suorituskykyä kasvattavat ratkaisut kuitenkin kasvattavat samalla keräimen fyysistä kokoa tai monimutkaistavat sen rakennetta, jolloin myös keräimen toiminnan mallintaminen ja suunnittelu vaikeutuvat huomattavasti.

Tässä luvussa esitellään pääpiirteittäin kirjallisuudessa esiteltyjä keinoja talteen kerätyn energian määrän ja keräimen taajuuskaistan kasvattamiseksi induktiivisissa keräimissä. Menetelmät on jaoteltu lineaarisiin ja epälineaarisiin menetelmiin sen mukaan, miten keräimen tuottamaa tehoa lisäävä ilmiö vaikuttaa keräimen värähtelijän dynamiikkaan.

3.1 Lineaariset menetelmät

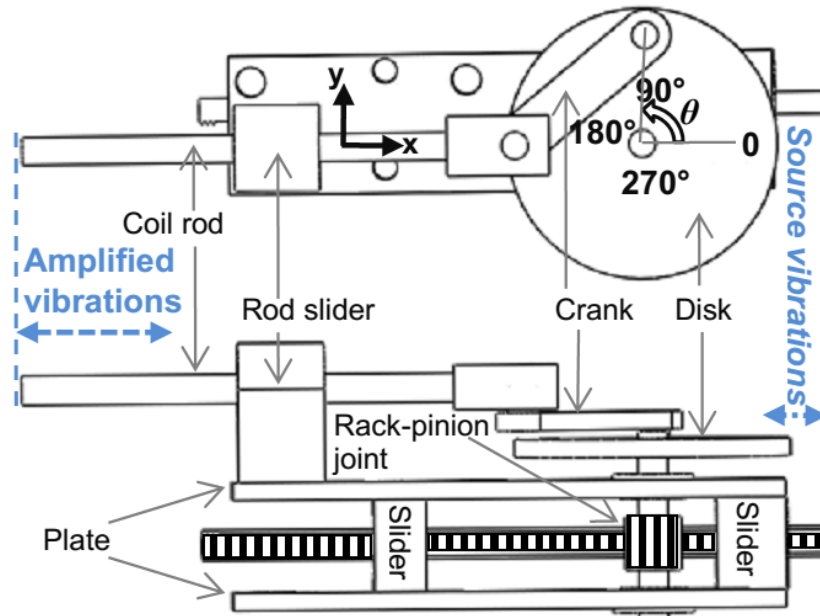
Lineaarisilla menetelmillä pyritään kasvattamaan induktiivisen keräimen tuottaman tehon määrää matala-amplitudisesta ja -taajuisesta värähtelystä, josta kineettistä energiaa on niukalti tarjolla. Tällaista värähtelyä esiintyy runsaasti esimerkiksi ihmisen liikkumisen seurauksena. Talteen kerätyn energian lisäksi myös induktiivisten keräimien taajuuskaistaa on pyritty kasvattamaan niiden taajuusriippuvuuden vähentämiseksi. Kirjallisuudessa esitetyt menetelmät pyrkivät mekaanisesti tai magneettisten voimien avulla voimistamaan värähtelyn ominaisuuksia energian talteen keräämisen maksimoiseksi. Myös useampaa energianmuuntamisteknologiaa yhdistelevät hybridiharvesterit lasketaan diplomi-työssä lineaarisiin menetelmiin.

3.1.1 Ulkoisen värähtelyn vahvistaminen

Käytännön sovelluskohteissa talteen kerättävää ulkoista kineettistä energiaa voi olla saatavilla niukasti. Erityisesti ihmisen liikkeissä esiintyvän värähtelyn taajuus ja amplitudi ovat usein varsin pieniä. Lineaarisesti toimivan induktiivisen keräimen tuottama teho on yhtälön (12) mukaan verrannollinen ulkoisen värähtelyn kulmataajuuden ($\omega = 2\pi \cdot f$) kuutioon ja ulkoisen värähtelyn amplitudin neliöön. Ulkoisen värähtelyn taajuudella ja amplitudilla on näin ollen suuri vaikutus keräimen tuottaman tehon määrään. Tutkimuksissa keräimen tuottamaa tehoa on lisätty kasvattamalla keräimen sisällä värähtelevän magneettipiirin värähdysliikkeen amplitudia [7] sekä muuntamalla magneettipiirin värähtelyn taajuutta suuremmaksi, jolloin suurempitaajuisesta värähtelystä saadaan tuotettua sähköiseen kuormaan suurempi teho [8].

Shahosseini ja Najafi tutkivat erillisen mekaanisen vahvistimen vaikutusta induktiivisen keräimen tuottamaan tehoon matala-amplitudisesta ja -taajuisesta värähtelystä [7]. Tutkimuksissa rakennettu vahvistin (kuva 7) koostuu hammastangosta ja -pyörästä sekä kiekon ja kammen yhdistelmästä. Ulkoisen värähtelyn värähdysliikkeeseen saattaman hammas-tangon kautta värähtely kytkeytyy hammaspyörän ja akselin välityksellä kiekon pyörimisliikkeeksi. Kiekon reunaan kiinnitetty kampi muuttaa pyörivän liikkeen mäntämäiseksi, joka liikuttaa keräimen kelaa edestakaisin. Kiekon ja hammaspyörän kulmanopeuksien pysyessä samana, suurempisäteisen kiekon tuottaman mäntämäisen liikkeen värähtelyn amplitudi ja nopeus ovat suurempia verrattuna hammastangon värähtelyyn. Keräimeen liitetty erillinen mekaaninen vahvistin lisäsi kelan liikkeen amplitudia ± 1 mm:stä ± 4 mm:iin. Kelan liikkeen amplitudin ja nopeuden kasvamisen myötä induktiivisen keräimen tuottama teho kasvoi 16-kertaiseksi (1,9 mW:sta 30 mW:iin). Samalla

tuotetun tehon kasvaminen nelinkertaisti kyseisen keräimen tehotiheyden, vaikka laitteen fyysinen koko kasvoi 40 cm^3 :ä mekaanisen vahvistimen lisääminen myötä.



Kuva 7. Ulkoisen värähtelyn amplitudia kasvattavan mekaanisen vahvistimen rakenne ylä- (ylhäällä) ja sivuprofiilista (alhaalla) katsottuna [7].

Matalataajuisesta värähtelystä talteen kerätyn energian määrää voidaan lisätä myös mekaanisella taajuusmuuntimella. Kirjallisuudessa esitellyt taajuuden muuntamista hyödyntävät keräimet koostuvat kahdesta erillisestä värähtelijästä, joista toisella resonanssitaajuus on matalilla ja toisella korkeammilla taajuuksilla. Resonanssitaajuudeltaan matalataajuisen värähtelijä, joka saatetaan värähtelemään ulkoisen värähtelyn vaikutuksesta, voi olla joko resonoiva tai resonoimaton värähtelijä. Resonoivalla värähtelijällä keräin tuottaa sähköiseen kuormaan suuremman tehon, mutta resonoimattomalla värähtelijälle keräimelle saadaan leveämpi taajuuskaista. Taajuuden muuntaminen tapahtuu värähtelyenergian siirtämisellä matalataajuisesta värähtelijästä korkeataajuisen värähtelijään, josta se edelleen muunnetaan sähköenergiaksi. Värähtelyenergia voidaan siirtää värähtelijästä toiseen muun muassa mekaanisen törmäyksen tai magneettisten voimien avulla. Törmäys on rakenteellisesti yksinkertaisempi ratkaisu, eikä se kasvata laitteen fyysistä kokoa. Mekaaninen kosketus kappaleiden kesken kuitenkin kuluttaa ja rasittaa värähtelijöitä. Magneettisten voimien käyttäminen puolestaan edellyttää ylimääraisten kestopagneettien lisäämistä keräimen rakenteeseen. Magneetit kasvattavat keräimen fyysistä kokoa eivätkä ne itsessään lisää tuotetun tehon määrää, jolloin keräimen tehotiheys huononee. [8]

3.1.2 Keräimen resonanssitaajuuden säätäminen

Kuten luvussa 2.4 on esitetty, lineaarisesti toimivan keräimen ulkoisesta värähtelystä hyötykäyttöön tuottama teho on voimakkaasti riippuvainen keräimen värähtelijän resonanssitaajuuden $\left(f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}\right)$ ja ulkoisen värähtelyn taajuuden yhteensovittamisesta.

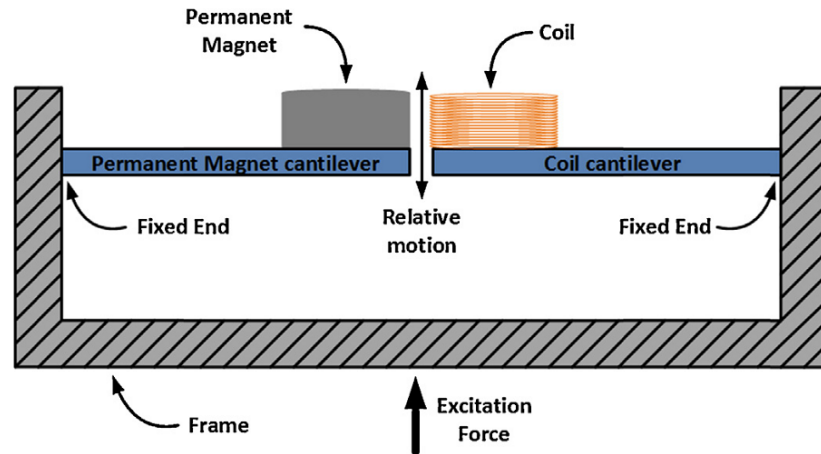
Keräimen tuottama teho pienenee voimakkaasti, kun lineaarinen keräin ei kerää energiaa talteen resonanssitaajuudellaan, kuten kuvan 4 kuvaajissa ja yhtälössä (12) on esitetty. Mikäli ulkoisen värähtelyn taajuusspektri on etukäteen tiedossa, on keräimen oma resonanssitaajuus helppo suunnitella ja sovittaa vastaamaan ulkoisen värähtelyn voimakainta taajuutta.

Lineaarisesti toimivan induktiivisen keräimen resonanssitaajuutta voidaan säätää värähtelijän jousivakiota tai värähtelevän massan suuruutta muuttamalla. Ulkoinen värähtely ei käytännön sovelluksissa ole aina kuitenkaan taajuudeltaan vakio, vaan värähtelyn taajuusspektrissä voi esiintyä useita dominoivia taajuuksia. Jossain sovelluskohteissa on myös mahdollista, että värähtelyn taajuusspektri voi muuttua ajan funktiona. Jotta keräin pystyisi keräämään energiaa talteen optimaalisesti sovelluskohteesta riippumatta, tulisi sen resonanssitaajuutta pystyä muuttamaan rakentamisen jälkeen (joskus jopa keräämisen aikana dynaamisesti) tai sen kaistanleveyden tulisi olla riittävän suuri, jotta kaikki voimakkaimmat värähtelytaajuudet saadaan hyödynnettyä. [6]

Värähtelevään palkkiin rakenteellisesti pohjautuvien induktiivisten keräimien resonanssitaajuutta voidaan muuttaa säätelemällä palkin jousivakiota. Palkin jousivakioon vaikuttaa materiaalin ominaisuuksien lisäksi palkin pituus. Lyhyt palkki värähtelee korkeammalla taajuudella kuin pidempi, jolloin resonanssitaajuutta voidaan siirtää ylöspäin tai alaspäin värähtelevän osan pituutta muuttamalla. Palkin värähtelevän osan pituutta voi kuitenkin olla vaikea muuttaa keräimen rakentamisen jälkeen tai dynaamisesti louhinnan aikana. Värähtelevän palkin resonanssitaajuutta voidaan kuitenkin muuttaa myös siirtämällä värähtelevän massan painopistettä palkilla. Mitä kauemmaksi massan painopiste saadaan siirrettyä palkin kiinnityskohdasta, sen matalammalle taajuudelle resonanssitaajuus siirtyy. Vastaavasti resonanssitaajuutta voidaan siirtää korkeammalle siirtämällä painopistettä kiinnityskohtaa kohti. [6]

3.1.3 Usean värähtelijän yhdistelmä

Lineaarisesti toimivien keräimien kapeaa taajuuskaistaa voidaan kasvattaa yhdistelemällä useampaa erillistä värähtelijää keskenään. Massaltaan erisuuruisten värähtelevien massojen yhteen kytkeminen aiheuttaa värähtelijäsysteemille kaksi erillistä resonanssitaajuutta, jolloin keräimen tehospektrissä havaitaan vastaavat kaksi piikkiä. Suunnittelemalla resonanssitaajuudet riittävän lähelle toisiaan saadaan keräimen taajuuskaistaa kasvatettua. [9]



Kuva 8. Kaksoisvärähtelijään perustuva induktiivinen keräin, jossa keräimen kela ja magneetti molemmat värähtelevät palkkien vaikutuksesta [10].

Ooi ja Gilbert esittelivät kaksoisvärähtelijään perustuvan induktiivisen keräimen (kuva 8), jossa keräimen kela ja magneetti molemmat sijaitsevat omien värähtelevien palkkiensa päissä [10]. Palkeille suunnitellut resonanssitaajuudet sijaitsivat lähellä toisiaan, jolloin keräimen sähköiseen kuormaan tuottama teho kasvoi resonanssitaajuuksien välisillä taajuuksilla verrattuna lineaariseen yhden värähtelijän keräimeen.

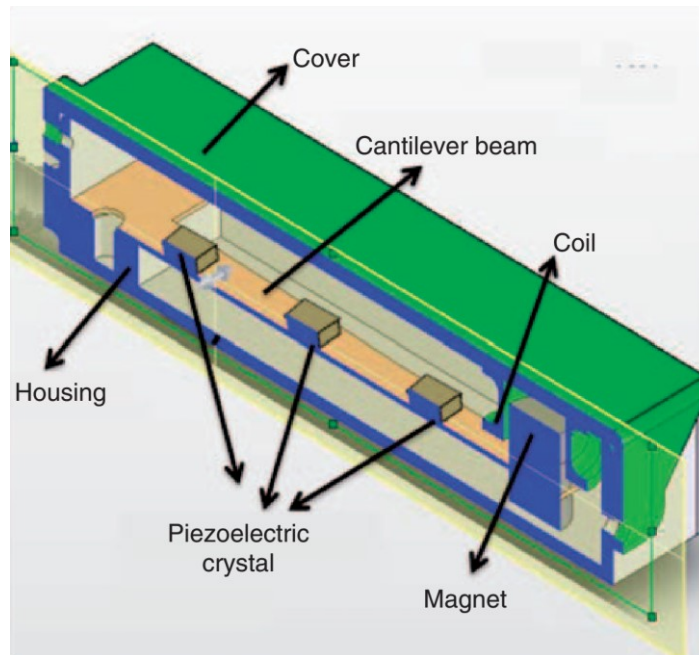
Värähtelevien massojen lisäksi sama efekti saadaan myös aikaan kytkemällä yhteen kokonaisia keräimiä. Sari et al. [11] kehittivät induktiivisesti toimivan keräimen, joka koostui 40:stä yksittäisestä yhteen kytketystä keräimestä. Yksittäisten keräimien resonanssitaajuudet oli suunniteltu lähelle toisiaan, jolloin kokonaissysteemin kaistanleveys kasvoi ja sen leveydeksi mitattiin 300 Hz. Keräimen kasvaneen kaistanleveyden lisäksi yhdistelmäkeräimen havaittiin tuottaman suuremman maksimitehon kuin yksittäiset keräimet.

3.1.4 Hybridikeräimet

Ulkoisesta energianlähteestä hyötykäyttöön kerätyn energian määrää voidaan lisätä myös yhdistelemällä samaan keräimeen eri energianmuutostekniikoita. Tadesse et al. [12] yhdistivät samaan keräimeen rinnakkain induktiivisen ja pietsosähköisen muunnostekniikan (kuva 9). Rakenteellisesti keräin koostuu värähtelevän palkin päässä olevasta magneetista, joka toimii palkin päässä painona sekä synnyttää magneettikentän induktiiviselle muutostekniikalle. Palkin värähdellessä magneetti liikkuu kelaan sisällä, jolloin muuttuva magneettivuo indusoi kelaan sähkövirran. Samalla värähtelystä aiheutuu mekaaninen rasitus palkin varteen. Kohtiin, jossa rasitus on suurinta, on asetettu pietsosähköisiä elementtejä, joiden terminaalien välille muodostuu jännite rasituksen vaikutuksesta.

Keräimen suorituskykyä mitattaessa hybridiharvesterin induktiivinen osuus tuotti tehoa paremmin matalilla ja pietsosähköinen korkeilla taajuuksilla, jolloin muunnostekniikoiden yhdistäminen kasvatti keräimen taajuuskaistaa ja lisäsi tuotetun tehon määrää. Usean

muunnostekniikan yhtäaikainen hyödyntäminen vaati kuitenkin monimutkaisemman muunnos- ja tehonhallintapiirin, jolloin energian keräämiseen tarvittava systeemi monimutkaistuu. [12]



Kuva 9. Induktiivista ja pietsosähköistä energianmuunnostekniikkaa yhdistelevä hybridikeräin [12].

3.2 Epälineaariset menetelmät

Epälineaarilla menetelmillä pyritään pääsääntöisesti kasvattamaan induktiivisen keräimen taajuuskaistaa, minkä ansiosta keräimellä voidaan potentiaalisesti kerätä ulkoista energiaa talteen tehokkaammin. Kasvaneen taajuuskaistan myötä keräin pystyy paremmin keräämään energiaa, vaikka ulkoisessa värähtelyssä esiintyisikin enemmän taajuusvaihtelua. Paremman taajuusvaihtelun sietämisen ansiosta keräimet soveltuvat paremmin käytännön sovelluskohteisiin. Joskus epälineaarilla ilmiöillä saadaan myös kasvatettua keräimen sähköiseen kuormaan tuottamaa maksimitehoa. [13]

Epälineaarisuudella tarkoitetaan induktiivisen keräimen yhteydessä värähtelysteemiin tuotavaa epälineaarista ilmiötä, joka muuttaa systeemin dynamiikkaa lineaarisesta epälineaariseksi. Systeemiin tuodun epälineaarisen ilmiön myötä värähtelevään massaan vaikuttava jousen palauttava voima ei käyttäydykään enää lineaarisesti. Epälineaarisuuden myötä luvussa 2 esitetty malli induktiiviselle keräimelle ei enää pidä paikkaansa, vaan keräimen mallintaminen täytyy tehdä Duffing'n yhtälön avulla. Epälineaarisuuden myötä keräimen mallintaminen vaikeutuu huomattavasti, sillä värähtelijän käytös muuttuu paljon monimutkaisemmaksi. Värähtelijän värähtelyliikkeisiin syntyy useampia rinnakkai-

sia tiloja, epästabiilisuutta ja kaoottista värähtelyä. Epälineaarisuutta voidaan tuoda värähtelijäsystemiin usean eri ilmiön avulla, joista seuraavissa aliluvuissa esitellään yleisemmin kirjallisuudessa esiintyvät. [14]

3.2.1 Epälineaariset jouset

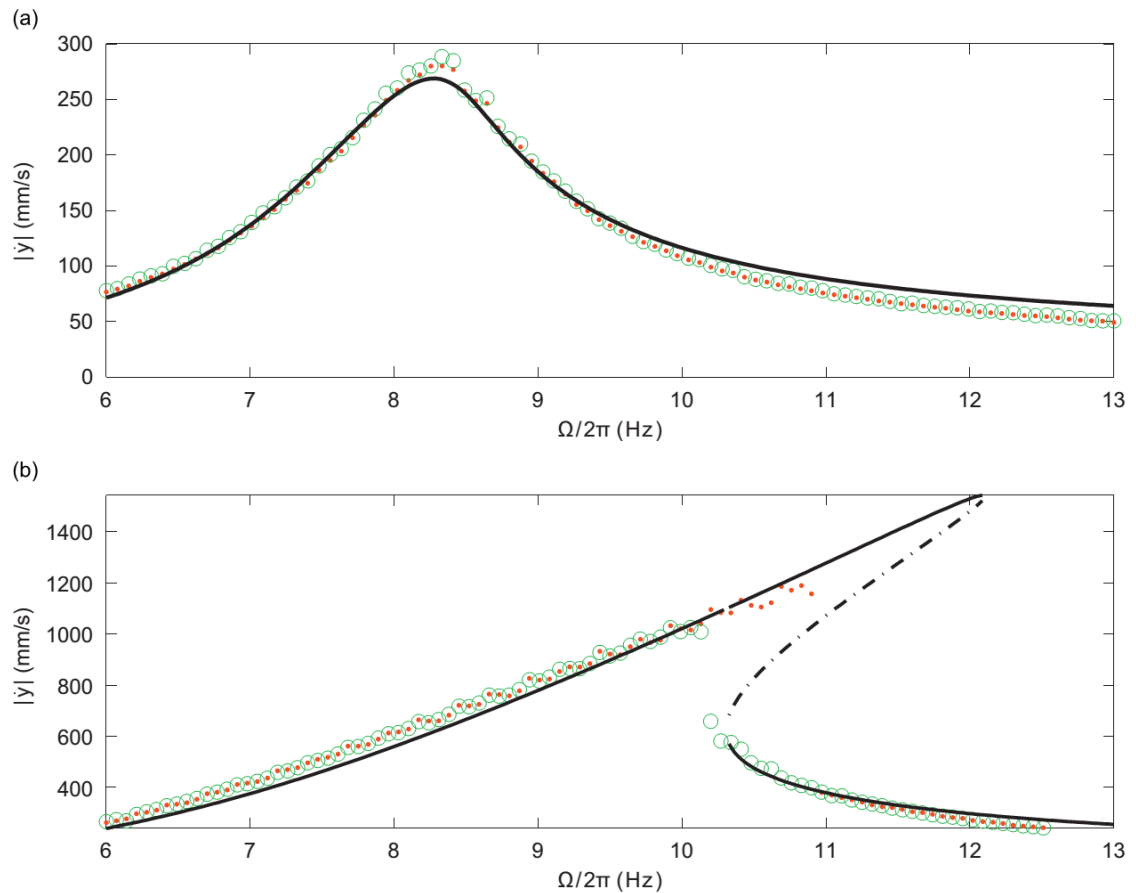
Epälineaaristen jousien jousivakio muuttuu jouseen vaikuttavan puristuksen suuruuden myötä, sillä jousen aiheuttaman voima suuruus ja puristuksen suhde ei käyttäydy lineaarisesti. Epälineaarisilla jousilla induktiiviseen keräimeen voidaan tuoda jousen jäykistymis- ja löysentymisilmiötä. Jousen jäykistymisilmiön vaikutuksesta ulkoisen värähtelyn amplitudin kasvaessa värähtelijän resonanssitaajuus siirtyy aina korkeammalle taajuudelle. Ilmiö voidaan havaita keräimen tehospektrissä näkyvän piikin kaartumisena korkeampien taajuuksien suuntaan. Jousen jäykistymisilmiötä kuitenkin havaitaan vain, kun värähtelyn taajuutta kasvatetaan matalista taajuuksista korkeammiksi. Vastaavasti jousen löysentymisilmiössä ulkoisen värähtelyn amplitudin kasvaessa värähtelijän resonanssitaajuus siirtyy aina matalimmille taajuuksille. Jäykistymisilmiön tavoin jousen löysentymisilmiötä voidaan havaita keräimen tehospektrissä vain siirryttäessä värähtelyn taajuuksissa korkeista taajuuksista matalimmille. [14]

Epälineaarinen jousi voidaan toteuttaa muun muassa magneettien veto- ja hylkimisvoiman avulla. Magneettisen voiman suuruus magneetikentässä heikkenee etäisyyden kasvaessa magneettiin, minkä avulla värähtelijään vaikuttava palauttava voima saadaan käyttäytymään epälineaarisesti. Mann ja Sims [15] hyödynsivät tutkimuksessaan magneettien välistä hylkimisvoimaa saattaakseen putkessa levitoivan magneetin epälineaariseen värähtelyyn. Tutkimuksessa käytetty keräin koostuu teflonputken sisään asetusta magneettista ja putken ympärille käämitystä kelasta. Putken sisällä oleva magneetti saatettiin levitoimaan asettamalla kumpaakin putken päähän magneetti siten, että magneettien napaisuudet vastaavat putken sisällä olevan magneetin napoja, jolloin magneettinen hylkimisvoima kumoaa painovoiman.

Tutkimuksessa todettiin magneettisen jousen epälineaarisuuden potentiaalisesti kasvattavan keräimen taajuuskaistaa. Keräimen sisällä värähtelevän magneetin kokemalla mekaanisella vaimennuksella havaittiin olevan suuri merkitys keräimen taajuuskaistan kasvatamiseen. Mitä suuremman mekaanisen vaimennuksen keräimessä levitoiva magneetti koki, sitä voimakkaampaa ulkoista värähtelyä tarvittiin magneettisen jousen epälineaarisuuden aktivoimiseen ja keräimen taajuuskaistan kasvattamiseen. [15]

Kuvassa 10 esitetään tutkimuksen kohteena olleen levitoivan magneetin värähtelyn nopeus taajuuden funktiona. Kuvassa 10a ulkoisen värähtelyn voimakkuus $\left(a = 2,1 \frac{m}{s^2}\right)$ ei riitä aktivoimaan keräimen magneettisen jousen epälineaarisuutta. Tällöin keräimen vä-

rähtelijä käyttäytyy lineaarisen keräimen värähtelijän kaltaisesti. Levitoiva magneetti saavuttaa huippunopeutensa resonanssitaajuudella, mutta sen nopeus pienenee varsin nopeasti, kun taajuuksissa siirrytään pois resonanssitaajuudelta. [15]

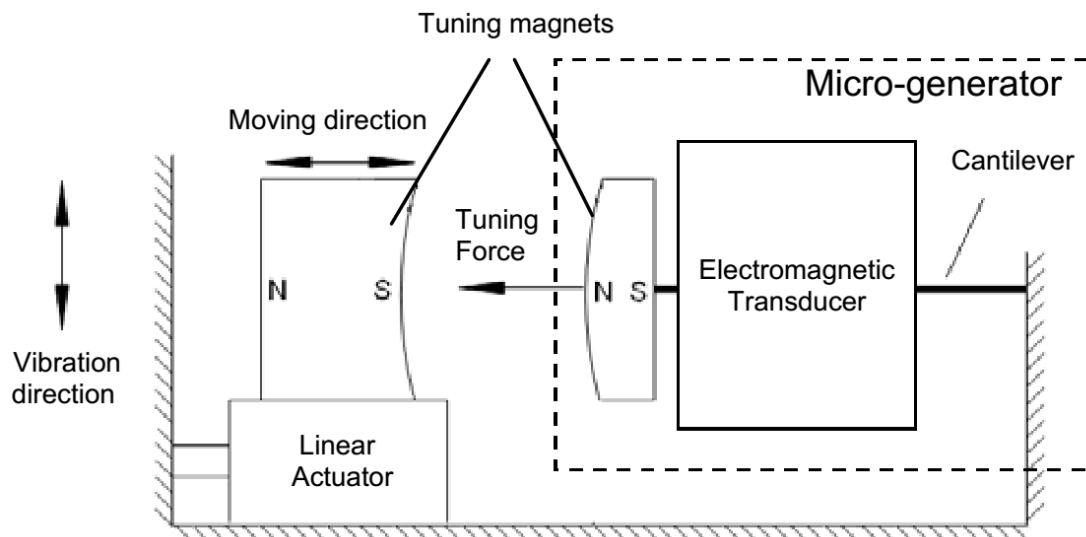


Kuva 10. Keräimen sisällä levitoivan magneetin nopeus taajuuspyyhkäisyssä. Kuvassa a) ulkoisen värähtelyn voimakkuus ei riitä aktivoimaan magneettisen jousen epälineaarisuutta. Kuvassa b) jousen epälineaarisuus on aktivoitunut. Punaiset pisteet kuvaavat taajuuksissa ylöspäin ja vihreät ympyrät alaspäin pyyhkäisyä. Musta käyrä kuvaa Duffing'n yhtälöillä laskettua teoreettista mallia (yhtenäinen viiva kuvaa stabiilia ja katkoviiva epästabiilia arvoa). [15]

Kuvassa 10b ulkoisen värähtelyn voimakkuus ($a = 8,4 \frac{m}{s^2}$) riittää aktivoimaan magneettisen jousen epälineaarisuuden, jonka seurauksena värähtelijän resonanssitaajuus siirtyy suuremmalle taajuudelle. Levitoivan magneetin nopeuden kuvaajan piikki myös kaareutuu korkeampien taajuuksien suuntaan, mikä johtuu jousen jäykistymisilmiöstä. Levitoivan magneetin värähtelyyn syntyy kuitenkin myös rinnakkaisia tiloja, mikä havaitaan kuvaajan korkeammilta taajuuksilta. Epälineaarisuuden myötä levitoiva magneetti saadaan liikkumaan keräimen sisällä suuremmilla nopeuksilla useammilla taajuuksilla, mikä teoriassa mahdollistaa suuremman tehon tuottamisen laajemmalla taajuuskaistalla. [15]

3.2.2 Aksiaalinen kuormitus

Induktiivisen keräimen resonanssitaajuutta voidaan säätää myöskin värähtelijään vaikuttavien venytys- ja puristusvoimien vaikutuksesta. Zhu et al. [16] rakensivat ja tutkivat värähtelevään palkkiin pohjautuvan induktiivisen keräimen, jonka resonanssitaajuutta voidaan säätää magneettisen vetovoiman avulla (kuva 11). Kestomagneettien palkkiin aiheuttaman vetorasituksen takia keräimen värähtelijän resonanssitaajuus muuttuu. Taajuuden muutos on sitä suurempi, mitä suurempi vetorasitus värähtelevään palkkiin kohdistetaan. Kestomagneettien välistä etäisyyttä voidaan säätää dynaamisesti, jolloin keräimen resonanssitaajuutta voidaan muuttaa jopa sen kerätessä energiaa talteen. Kestomagneettien ollessa lähellä toisiaan niiden aiheuttama vetovoima ja siten myös palkkiin kohdistuva vetorasitus ovat suurimmillaan, jolloin keräimen resonanssitaajuus on siirtynyt korkeammalle taajuudelle. Keräimen resonanssitaajuutta saadaan myös laskettua matalammalla taajuudelle kohdistamalla palkkiin puristuskuormitusta. [16]

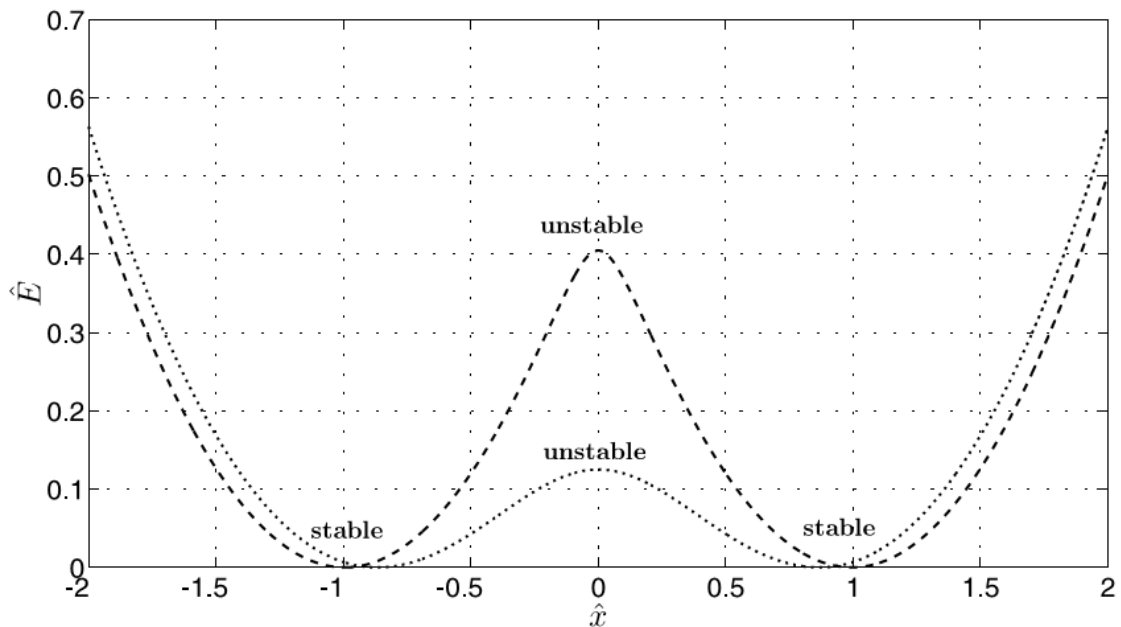


Kuva 11. Keräimen resonanssitaajuuden säätömekanismi, jossa palkin jännitystä voidaan säätää kestomagneettien vetovoiman avulla [16].

Puristavalla aksiaalisella kuormituksella keräimen värähtelevän palkin värähtelyliike voidaan myöskin saattaa monostabiilista tilasta bistabiiliin tilaan (kappale 3.2.3). Kun palkkiin kohdistuva aksiaalinen kuormitus ylittää palkin kriittisen nurjahduskuormituksen (akσιαalinen kuormitus, jolloin palkin resonanssitaajuus putoaa teoriassa 0 Hz:iin), palkin värähtely muuttuu bistabiiliseksi. Nurjahduskuormituksen jälkeen värähtelevän palkin resonanssitaajuus siirtyy taas korkeammille taajuuksille aksiaalisen kuormituksen edelleen voimistuessa. Tämän takia värähtelevällä palkilla voi olla sama resonanssitaajuus sekä mono- että bistabiilissa tilassa. Aksiaalisen kuormituksen suuruus vaikuttaa myös värähtelyn bistabiiliin tilaan syntyvien potentiaaliakivojen välisen potentiaalivallin suuruuteen. [17]

3.2.3 Bistabiilisuus

Bistabiilius on värähtelijäsystemin epälineaarinen ilmiö, jossa keräimessä olevan värähtelijän liike keskittyy kahteen asemaan sekä näiden asemien välisiin värähdysiksiin. Värähtelijän bistabiiliudella pyritään kasvattamaan värähtelevän massan liikkeen suuruutta ja sen nopeutta suhteessa keräimen monostabiilisti värähtelevän massan liikkeeseen. Tekniikan perusideana on saada lineaarisen monostabiilin keräimen värähtelijän sinimuotoinen värähdysliike muutettua kanttiaallon muotoon. Tällöin bistabiilin värähtelijän massa liikkuu nopeammin värähdysliikkeen suunnanmuutoksissa, minkä takia bistabiilisesta värähtelystä voidaan teoriassa tuottaa enemmän tehoa kuin monostabiilisesta. Värähtelyn bistabiiliisuudesta saatava etu korostuu varsinkin, kun ulkoisen värähtelyn ja keräimen resonanssiaajuudet ovat kaukana toisistaan ja lineaarisesti toimivan keräimen tehon tuottaminen huononee. [18]



Kuva 12. Bistabiilin keräimen jousisysteemin potentiaalienergia. Kuvaajaan muodostuu kolme tasapainotilaa, joista kaksi ovat stabiileja ja yksi on epästabiili. Katkoviivalla on esitetty systeemin potentiaalienergia, kun systeemissä on käytetty löysempiä jousia. Pisteillä esitetty kuvaaja vastaa identtistä systeemiä, mutta jäykemmällä jousilla. [18]

Ramlan et al. [18] kehittivät ja tutkivat kahteen lineaariseen kierrejouseen pohjautuvan bistabiilin induktiivisen keräimen, jossa jousien varaan ripustettu massa värähtelee kahdessa tasapainopisteessä sekä niiden välillä. Jousisysteemin avulla keräimen värähtelijälle synnytetään kolme tasapainoasemaa, joista kaksi ovat stabiileja ja yksi on epästabiili (kuva 12). Jousisysteemin potentiaalienergian kuvaajaan (kuva 12) syntyvän satulapisteen korkeus on riippuvainen massaa kannattelevien kierrejousien jousivakiosta ja on sitä suurempi, mitä löysempiä käytetyt jouset ovat. Keräimessä värähtelevä massa värähtelee systeemin toisen stabiilin tasapainotilan ympärillä, kunnes ulkoisen värähtelyn energia

riittää puristamaan jousia riittävästi kasaan ja työntämään massan energiavallin yli systeemin toiseen stabiiliin tasapainotilaan. Stabiilien tasapainotilojen välinen värähtely on energian talteen keräämisen kannalta ideaalisinta, sillä se tuottaa värähtelevälle massalle keräimen rakenteen salliman suurimman mahdollisen värähdysliikkeen amplitudin ja nopeuden.

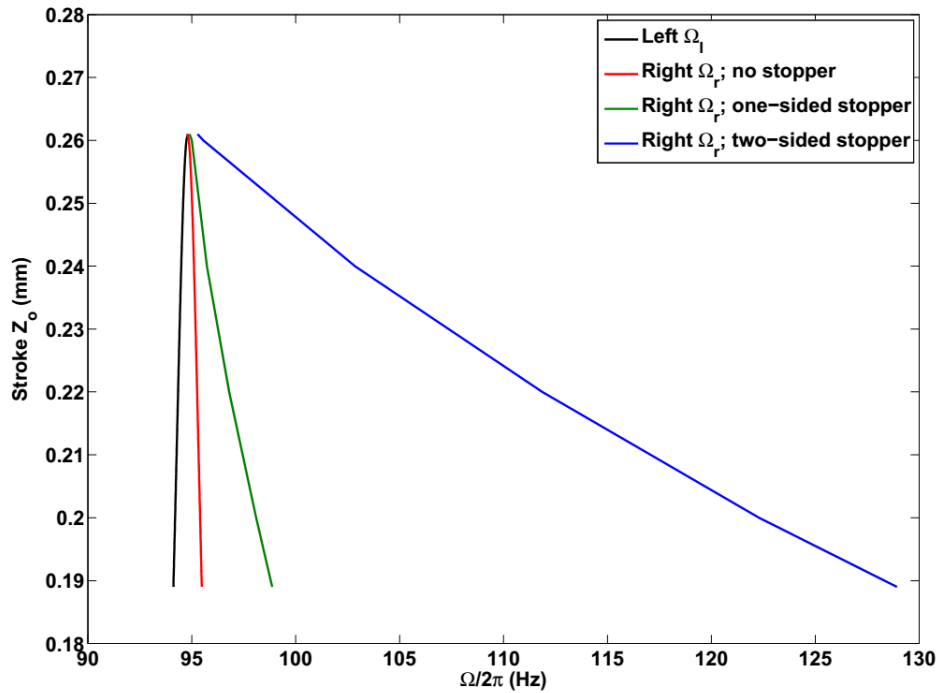
Mann ja Owens [19] tutkivat ja kehittivät bistabiilin induktiivisen keräimen magneettisten jousien sekä magneettisen hylkimisvoiman avulla. Värähtelijän bistabiilisuus saatiin aikaan asettamalla keräimen värähtelevänä massana toimiva levitoiva magneetti hylkimään keräimen keskikohtaa. Hylkimisen aiheuttavat voimat saatiin aikaan ulkoisten keskomagneettien avulla. Keräimen kykyä tuottaa tehoa sähköiseen kuormaan tutkittiin eri taajuuksilla ja voimakkuudeltaan eri suuruisilla ulkoisilla värähtelyillä.

Ulkoisen värähtelyn ollessa heikkoa keräimen tehospektrin havaittiin muistuttavan lineaarisesti toimivan keräimen tehospektriä. Ulkoisen värähtelyn voimistuessa keräin saatiin tuottamaan tehoa aina suuremmalta taajuuskaistalta. Keräimen havaittiin vaativan tietyn suuruisen ulkoisen värähtelyn, jotta levitoivan magneetin värähtely saatiin siirrettyä bistabiiliin tilaan ja värähtelemään stabiilien tasapainotilojensa välillä. Keräimen sähköiseen kuormaan tuottamassa tehossa havaittiin selvä parannus, kun keräimen värähtelijä värähtelee bistabiilisessa tilassa stabiilien tasapainotilojen välillä. Ulkoisen värähtelyn amplitudin kasvattamisella bistabiilisen värähtelyn alkamisen jälkeen ei havaittu olevan enää parantavaa vaikutusta keräimen tuottamaan tehoon. [19]

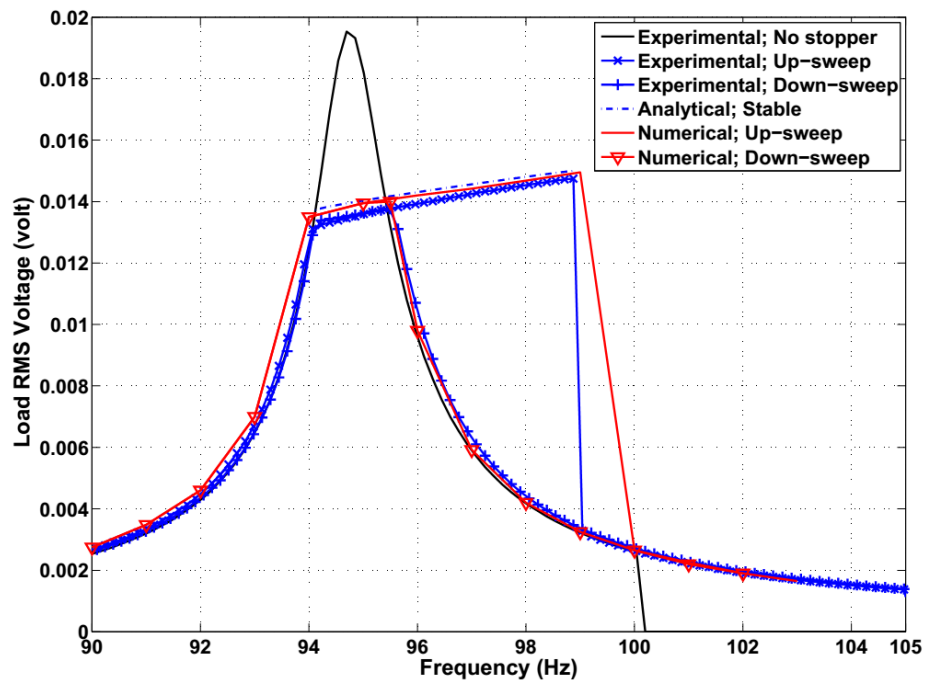
3.2.4 Värähtelijän amplitudin rajoittaminen

Lisäämällä induktiiviseen keräimeen sen värähtelijän liikettä rajoittavat mekaaniset rajoittimet saadaan värähtelijän jäykkyys hetkellisesti kasvamaan massan ja rajoittimien törmäyshetkellä. Värähtelijän jäykkyyden muuttuessa myös värähtelevän massa kokeen palauttavan voiman suuruus muuttuu. Mekaanisten rajoittimien ansiosta jousien palauttavasta voimasta saadaan paloittain määritelty, minkä ansiosta keräimen taajuuskaista levenee. Ulkoisen värähtelyn tulee kuitenkin olla voimakkuudeltaan riittävän suurta, jotta keräimen värähtelijä saa riittävästi nopeutta törmätäkseen rajoittimiin. Mekaanisten törmäysten takia keräimen osat kuitenkin kokevat enemmän rasitusta ja keräin saattaa vioittua nopeammin kuin rakenteeltaan yksinkertainen keräin. Keräimen tuottama maksimiteho myöskin pienenee värähtelijän rajoitetun liikeradan takia. [13]

Soliman et al. [20] tutkivat amplitudin rajoittamisen vaikutusta induktiivisen keräimen kaistanleveyteen. Värähtelyn amplitudin rajoittaminen liikkeen molempiin suuntiin havaittiin kasvattavan keräimen taajuuskaistaa enemmän kuin vain toisen värähtelysuunnan rajoittaminen (kuva 13). Keräimen taajuuskaistaa saatiin kasvatettua suuremmaksi, mitä lähempänä amplitudin rajoittimet olivat värähtelevää massaa (kuva 13). Keräimen taajuuspyyhkäisyssä rajoittimien havaittiin aiheuttavan keräimeen hystereesiä sekä alentavan sen sähköiseen kuormaan indusoimaa jännitettä (kuva 14).



Kuva 13. Mekaanisten rajoittimien etäisyyden vaikutus keräimen kaistanleveyden suuruuteen. Musta käyrä esittää kaistanleveyden alataajuuden ja on sama kaikilla rakenteilla. Punainen käyrä esittää rajoittamattoman perusrakenteen, vihreä käyrä yhden rajoittimen ja sininen käyrä kahden rajoittimen rakenteen taajuuskaistan ylätaajuuden. [20]



Kuva 14. Rajoittamattoman (musta käyrä) ja yhden rajoittimen rakenteen (punainen ja sininen käyrä) vaikutus keräimen jännitespektriin. Punaisella on esitetty simulointimallista saatu ja sinisellä prototyypistä mitattu jännitespektri. [20]

3.2.5 Värähtelyn kiihdyttäminen massan avulla

Usean värähtelevän massan systeemiin voidaan myös tuoda epälineaarisuuksia keräimen tehokkuuden parantamiseksi. Frizzel et al. [21] tutkivat kahteen värähtelevään massaan pohjautuvaa keräintä, jossa yhdisteltiin värähtelevän massan nopeuden kasvattamista ja törmäyksien avulla luotua epälineaarisuutta. Tutkimuksissa rakennettiin ja mitattiin kaksi keräinprototyyppiä, joista toinen oli rakenteeltaan yksinkertaistettu ja toinen optimoitu. Keräimien suorituskyvyn parantaminen perustui massojen keskinäisiin kimmoisiin törmäyksiin ja niissä tapahtuvaan liikemäärän siirtymiseen. Suuren ja pienen massan kimmoisassa törmäyksessä pieni massa saa törmäyksen jälkeen alkuperäistä nopeuttaan suuremman nopeuden, mikä teoriassa mahdollistaa suuremman tehon tuottamisen keräimellä.

Rakenteeltaan yksinkertaisemmalla keräimellä tutkittiin massojen kiinnitystavan vaikutusta värähtelyliikkeen nopeuden maksimoinnissa. Keräimen sähköiseen kuormaan tuottamaa tehoa mitattiin keräimen viidellä eri konfiguraatiolla. Parhaimmaksi osoittautui konfiguraatio, jossa suuri massa on jousella kiinnitettynä keräimen runkoon ja pienen massa jousi on irrotettuna suuresta massasta. Tällöin ulkoinen värähtely aktivoi keräimen runkoon kiinnitetyn jousen kautta suuren massan värähtelyä yhtäjaksoisesti. Pienen massan irrotetun jousen ansiosta massan nopeus ei hidastu missään kohtaa värähdysliikettä. Konfiguraation mukainen systeemi tuottaa suurimman mahdollisen tehon, kun erisuurten massojen liike on synkroniassa keskenään siten, että liikkeiden suunnat ovat vastakkaiset massojen törmäyshetkellä. [21]

Rakenteellisesti optimoitua keräintä mitattiin kahdella eri konfiguraatiolla, joissa molemmissa pienen massan jousi on irrotettuna suuresta massasta. Suuren massan jousen kiinnitys vaihdeltiin konfiguraatioiden välillä. Ulkoisen värähtelyn ollessa voimakkuudeltaan heikompaa, optimoidun keräimen havaittiin tuottavan suurempia tehoja avoimen kiinnityksen konfiguraatiossa. Ulkoisen värähtelyn voimakkuuden kasvaessa kiinnitetyllä konfiguraatiolla kuitenkin saatiin tuotettua sähköiseen kuormaan suurempi maksimiteho. [21]

4. INDUKTIIVISIEN KERÄIMIEN SUORITUSKY- VYN MITTAAMINEN

Energian keräämisen monimuotoisuus asettaa sen kehitys- ja tutkimustyölle tiettyjä haasteita. Energiaa voidaan kerätä talteen usealla eri tekniikalla ja saman tekniikan puitteissa keräimessä voidaan käyttää useita erilaisia rakenteita ja materiaaleja. Tutkimuksissa ja käytännön sovellusten kehittämistyössä tulee usein tarve verrata erilaisten keräimien ominaisuuksia, kuten keräimen tuottaman tehon suuruutta. Kuitenkin rakenteellisesti erilaisten keräimien keskinäinen vertaileminen on osoittautunut hankalaksi asiaksi. Talteen kerätyn energian määrään vaikuttavat niin keräimen fyysinen koko, energian muuntamiseen käytetty tekniikka kuin eri tilanteissa saatavilla olevan ulkoisen energian ominaisuudet. Jokainen edellä mainituista tekijöistä vaikuttaa eri keräimien teho- ja energia-arvojen keskinäiseen vertailukelpoisuuteen.

Erilaisten keräimien keskinäisen vertailukelpoisuuden mahdollistamiseksi kirjallisuudessa on esitetty ja ehdotettu useita keräimen hyvyttä ja sen tuottamaa tehoa mittaavia suureita. Jokaisessa mittasuureessa kuitenkin painottuvat keräimen tietyt ominaisuudet toisia enemmän, minkä takia on tärkeää ymmärtää, mitä ominaisuuksia mikäkin mittasuure suosii. Mittasuureiden painottamat ominaisuudet määrittävät millaisten keräimien mittaamiseen ne soveltuvat, jotta mittasuure antaa keräimen hyvyydestä realistinen kuvan. Lineaarisesti toimivien induktiivisten keräimien mittaamiseen mittasuure, joka ei painota keräimen taajuuskaistan leveyttä, voi soveltua hyvin, mutta epälineaarisesti toimivan keräimen mittaamiseen se ei sovellu. Tässä luvussa esitellään muutamia kirjallisuudessa esitettyjä mittasuureita, jotka soveltuvat kineettistä energiaa talteen keräävien induktiivisten keräimien hyvyyden mittaamiseen ja arviointiin. [22]

4.1 Tehotiheys

Intuitiivisin tapa vertailla erilaisia keräimiä keskenään on verrata niiden sähköiseen kuormaan tuottaman tehon suuruutta toisiinsa. Sähköisen kuorman kannalta on mielekkäämpää mitata keräimen tuottamaa jatkuvaa tehoa hetkellisten tehopiikkien sijaan. Jatkuvasta tehosta, jota myös RMS-tehoksi (engl. Root Mean Square) jossain lähteissä kutsutaan, saadaan parempi käsitys, kuinka keräin käyttäytyy pitemmällä aikavälillä. Induktiivisien keräimien kohdalla fyysisen koon vaikutus talteen kerättyyn tehoon on merkittävä, jolloin erisuuruisten keräimien tuottamat tehot eivät rakenteellisista syistä ole suoraan vertailukelpoisia keskenään. Keräimen suurempi koko sallii sisälleen suurempimassaisen värähtelijän, jolloin magneettikentästä on mahdollisuus saadaa voimakkaampi, tai vaihtoehtoisesti värähtelijälle voidaan antaa enemmän tilaa liikkua.

Ratkaisuna rakenteellisten eroavaisuuksien luomaan ongelmaan Cao et al. [23] ehdottivat yksinkertaista mittasuureta, tehotiheyttä, jossa keräimen tuottama teho suhteutettaisiin sen omaan tilavuuteen. Suhteuttamisen ansiosta koon kasvattamisen ansiosta kasvanut teho saadaan kompensoitua. Tehotiheys voidaan kirjoittaa matemaattisesti yhtälönä:

$$PD = \frac{P_{max}}{V}, \quad (27)$$

jossa PD (engl. Power Density) on tehotiheys, P on keräimen tuottaman tehon maksimiarvo ja V on keräimen tilavuus.

Vaikka tehotiheys huomioi keräimen fyysisen koon vaikutuksen kuormavastukseen tuotettuun tehoon, se ei huomioi millaisesta ulkoisesta energianlähteestä energia kerätään talteen. Keräimen sähköiseen kuormaan tuottama teho on neliöllisesti verrannollinen ulkoisen värähtelyn kiihtyvyyden huippuarvoon, kuten yhtälössä (18) on esitetty. Energianlähteen ominaisuuksilla on siis suuri vaikutus keräimen tuottamaan tehoon ja sitä kautta myös keräimen tehotiheyden arvoon. Eri keräimien vertailukelpoisuuden saamiseksi tulisi tuotetun tehon mittausten olosuhteet standardoida. [22].

Kompensoidakseen ulkoisen energianlähteen ominaisuuksien vaikutuksen suorituskyykyä mittaavassa mittasuureessa, Beeby et al. [24] ehdottivat keräimen tuottaman tehon suhteuttamista myös ulkoisen värähtelyn voimakkuuteen. Normalisoitu tehotiheys voidaan esittää yhtälön muodossa seuraavasti:

$$NPD = \frac{P_{max}}{a^2V}, \quad (28)$$

jossa NPD (engl. Normalized Power Density) on normalisoitu tehotiheys ja a on ulkoisen värähtelyn kiihtyvyys.

Normalisoitu tehotiheys antaa hyvän työkalun rakenteellisesti erilaisten keräimien tuottaman tehon keskinäiseen vertailuun. Sen avulla voidaan vertailla ja tutkia, millainen keräimen rakenne tuottaa eniten tehoa suhteessa omaan kokoonsa. Sitä ei suoraan voida kuitenkaan käyttää keräimien hyvyyden arviointiin, sillä se ei ota huomioon kaikkia suorituskyyvyn kannalta tärkeitä tekijöitä. Esimerkiksi keräimen kaistanleveyttä ei normalisoidun tehotiheyden määritelmässä huomioida mitenkään, jolloin epälineaarisesti toimivien keräimien suorituskyyvyn kannalta eräs tärkeimmistä ominaisuuksista jää täysin ilman painoarvoa. Keräimen kaistanleveyden merkitys korostuu entisestään käytännön sovelluskohteissa, joissa energiaa pitää pystyä keräämään laajalta taajuusalueelta. [24]

4.2 Tehokkuus

Luvussa 4.1 esitetty tehotiheys mittaa keräimien sähköiseen kuormaan tuottaman tehon suuruutta. Tutkimuksen kannalta voi kuitenkin joissakin tilanteissa olla mielekkäämpää

selvittää tuotetun tehon suuruuden sijaan, kuinka tehokkaasti energiaa kerätään talteen. Tehokkuuden avulla erilaisten tekniikoiden ja rakenteiden suorituskykyä voidaan paremmin verrata keskenään. Sen avulla voidaan myös mitata, kuinka lähellä ideaalista keräintä analysoitava keräin on sen rakenne ja keräystekniikka huomioiden (vrt. hyötysuhde).

Yleisesti värähtelijän hyvyyttä kuvataan sen hyvyysluku avulla, joka määrittää sen resonanssitaajuuden suhteena sen kaistanleveyteen. Suuri hyvyysluku indikoi kapeaa taajuuskaistaa, jolloin värähtely pienenee nopeasti resonanssitaajuudesta pois siirryttäessä. Värähtelijät, joilla on suuri hyvyysluku, kokevat vähän vaimennusta ja vapaa värähtely pysähtyy hitaammin, kuin pienemmän hyvyysluvun värähtelijät.

Värähtelijän hyvyysluvun pohjalta Roundy [25] esitti siihen pohjautuvan mittasuureen keräimien tehokkuuden määrittämiseksi. Keräimen tehokkuus määrittää seuraavan yhtälön mukaan:

$$e = \kappa^2 Q^2 \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\lambda}{\lambda_{max}}, \quad (29)$$

jossa e on keräimen tehokkuus, κ on sähkömagneettinen kytkeytymiskerroin, Q on keräimen hyvyysluku, ρ_0 on vertailukohtainen tiheys, ρ on keräimen tiheys, λ_{max} on maksimimaalinen tehon siirtymiskerroin ja λ on keräimen tuottaman tehon siirtymiskerroin.

Yhtälön (29) mukaan määritetty tehokkuus painottaa keräimen tekijöitä, joilla on merkittävä vaikutus induktiivisen keräimen tuottamaan tehoon. Keräimen sähköiseen kuormaan tuottama teho kasvaa sähkömagneettisen kytkeytymisen paranemisen ja mekaanisten häviöiden minimoimisen (hyvyysluvun maksimointi) myötä. Tehokkuuteen vaikuttaa myös se, kuinka hyvin keräimen tuottama teho saadaan siirrettyä hyötykäyttöön sähköiseen kuormaan. Keräimen rakenteellisista eroavaisuuksista johtuva tehon kasvaminen on huomioitu mittasuureessa suhteuttamalla tekijät rakenteen määrittelemiin maksimiarvoihin. [25]

Roundyn määrittelemää tehokkuutta voidaan käyttää lineaarisesti toimivien keräimien suorituskyvyn arviointiin, mutta epälineaarisille keräimille kyseinen mittasuure ei ole optimaalinen. Keräimiin tuotavilla epälineaarisilla ilmiöillä pyritään pääsääntöisesti kasvattavat keräimen taajuuskaistaa, jotta tehoa voidaan tuottaa enemmän useammalla taajuudella. Epälineaariset ilmiöt saattavat kuitenkin vaikuttaa negatiivisesti keräimen hyvyyslukuun ja pienentävät siten keräimen tehokkuuden arvoa. Keräimen kasvanut taajuuskaista ja pienentynyt tehokkuus antavat ristiriitaista tietoa keräimen suorituskyvystä.

Yhtälön (29) mukaan määritellylle keräimen tehokkuudelle ei myöskään voida laskea teoreettista ylärajaa, sillä värähtelijän hyvyysluku Q voi teoriassa kasvaa äärettömän suureksi. Tässä tapauksessa ideaalinen keräin pystyisi tuottamaan rajattoman määrän sähköenergiaa. Mittasuuren avulla ei siis pystytä prosentuaalisesti ilmoittamaan, kuinka tehokkaasti keräin pystyy keräämään talteen energiaa ulkoisesta energianlähteestä. Tästä syystä

Roundyn määrittelemä tehokkuus on hieman epäideaalinen mittasuure ja Mitcheson et al. [26] esittelivät vaihtoehtoisen määritelmän keräimen tehokkuudelle:

$$E_H = \frac{\text{Useful Power Output}}{\text{Maximum Possible Output}} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}YZ_l\omega^3m}, \quad (30)$$

jossa Y on ulkoisen värähtelyn amplitudi ja ω on sen taajuus, Z_l on massan m värähtelyliikkeen maksimiamplitudi.

Yhtälön (30) mukaan määritellylle tehokkuudelle voidaan määrittää teoreettinen maksimiarvo, jolloin sitä voidaan käyttää keräimen suhteellisen tehokkuuden määrittämiseen. Suhteellisen tehokkuuden avulla voidaan määrittää, kuinka lähelle rakenteen sallimaa maksimitehoa kyseisellä keräimellä päästään tehon tuottamisessa. Yhtälö (30) määrittelee tehokkuuden analysoitavan keräimen tuottaman tehon suhteena rakenteeltaan samanlaisen keräimen ideaalisesti resonanssitaajuudella tuottamaan tehoon.

Keräimien tehokkuuden vertaileminen yhtälöllä (30) onnistuu hyvin, mutta sen avulla ei voida vertailla keskenään rakenteellisesti erilaisia keräimiä. Tehokkuuden avulla ei voida määrittää, minkälaisella rakenteella saadaan tuotettua paras teho. Se kuitenkin ilmaisee, kuinka paljon analysoitavassa keräimessä on käyttämätöntä potentiaalia jäljellä. Tehokkuus soveltuu mittasuurena paremmin lineaarisesti toimivien keräimien suorituskyvyn arviointiin, sillä taajuuskaistan leveyttä ei mittasuureessa huomioida. Yhtälön (30) mukainen tehokkuus määritellään vain yksittäisellä taajuudella, eikä epälineaarisesti toimivien keräimien paremmalla kaistanleveydellä ole vaikutusta tehokkuuteen. [26]

4.3 Tilavuuden ja kaistanleveyden hyvyysluvut

Luvussa 4.2 esitellyt tehokkuuden mittasuureet eivät sellaisenaan sovellu rakenteellisesti erilaisten keräimien väliseen vertailuun, mikä on tutkimus- ja kehitystyön kannalta epäsuotuisa tilanne. Ratkaisuksi tähän ongelmaan Mitcheson et al. [26] ehdottivat myös tehokkuuksille vaihtoehtoisen suureen, tilavuuden hyvyysluvun (FoM_V , engl. volume Figure of Merit). Tilavuuden hyvyysluku voidaan matemaattisesti kirjoittaa muotoon:

$$FoM_V = \frac{P_{max}}{\frac{1}{16}Y\rho_{AU}V^{\frac{4}{3}}\omega^3}, \quad (31)$$

jossa ρ_{AU} on kulan tiheys ja V on keräimen tilavuus.

Yhtälön (30) mukaan määritettyä tehokkuutta mukaillen tilavuuden hyvyysluku suhteuttaa keräimen tuottaman maksimitehon saatavilla olevan tehon suuruuteen. Tilavuuden hyvyysluku kuitenkin normalisoi keräimen sähköiseen kuormaan siirtämän tehon referenssikeräimen resonanssissa tuottamaan maksimitehoon. Referenssikeräin on tilavuus-

deltaan yhtä suuri kuin analysoitava keräin. Sen värähtelijän massa on kuitenkin geometrialtaan kuutio, jonka tiheys vastaa kullan tiehyttä. Värähtelevä massa täyttää tilavuudellaan puolet referenssikeräimen tilavuudesta jättäen toisen puolen tilaksi omalle värähtelylleen. Referenssikeräimen käyttö yhdenmukaistaa tehojen suhteuttamista ja mahdollistaa rakenteellisesti erilaisten keräimien vertailemisen keskenään. [26]

Vaikka tilavuuden hyvyysluku mahdollistaa rakenteeltaan erilaisten keräimien vertailemisen keskenään, se ei huomioi epälineaarisesti toimivien keräimien leveämpää kaistanleveyttä. Suorituskyvyn vertaileminen lineaarisesti ja epälineaarisesti toimivien keräimien kesken ei näin ollen onnistu tilavuuden hyvyysluvulla. Luonnossa ja käytännön sovelluskohteissa värähtelyn taajuusspektri on harvoin kapea ja energiaa pitäisi pystyä keräämään talteen laajalta taajuuskaistalta. Epälineaarinen keräin saattaa käytännön sovelluskohteesta usein kerätä enemmän energiaa talteen kuin vastaava lineaarisesti toimiva keräin.

Jotta lineaaristen ja epälineaaristen keräimien suorituskykyä voidaan verrata keskenään, tulee mittasuureen ottaa huomioon ja painottaa keräimien taajuuskaistan leveyttä. Ratkaisuna tähän ongelmaan Mitcheson et al. [26] esittelivät samassa artikkelissa hyvyysluvun myös kaistanleveydelle (FoM_{BW} , engl. bandwidth Figure of Merit). Kaistanleveyden hyvyysluku määritellään tilavuuden hyvyysluvun avulla ja voidaan matemaattisesti ilmaista seuraavalla tavalla:

$$FoM_{BW} = FoM_V \times \frac{\delta\omega_{1\text{ dB}}}{\omega}, \quad (32)$$

jossa $\delta\omega_{1\text{ dB}}$ kertoo 1 dB:n taajuuskaistan leveyden (Mitcheson et al. valitsivat mittasuureeseen 1 dB:n taajuuskaistan tavanomaisen 3 dB:n taajuuskaistan sijaan, jotta keräimien tasaisempia tehospektrejä korostetaan) ja ω kulmataajuus, jolla maksimiteho saadaan louhittua.

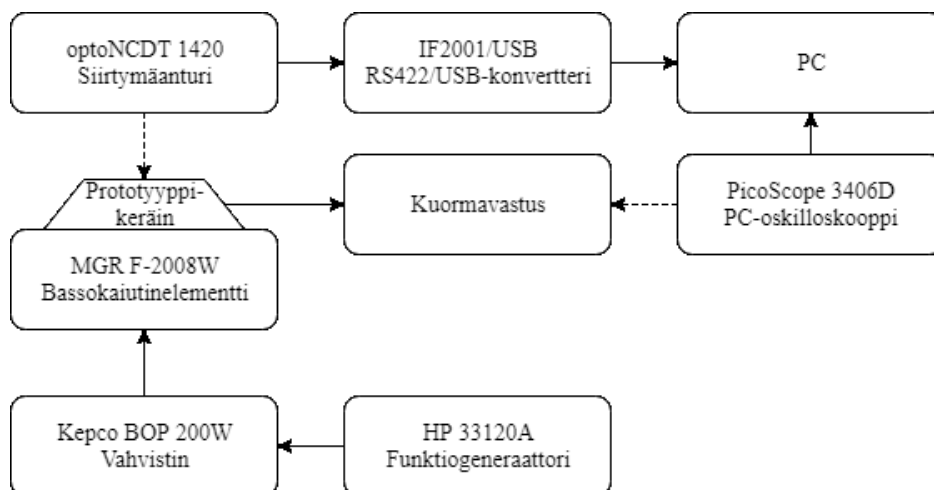
Kaistanleveyden hyvyysluku ei ole luvussa 4.2 esitetyn tehokkuuden tavoin verrannollinen värähtelijän hyvyyslukuun (Q -arvo) ja se suosii leveämmän taajuuskaistan keräimiä, minkä takia mittasuure soveltuu sekä lineaarisesti, että epälineaarisesti toimiville keräimille. Tilavuuden hyvyyslukuun pohjautumisen takia sitä voidaan myös käyttää rakenteellisesti erilaisten keräimien vertailemiseen keskenään. Aiemmin tehdyissä tutkimuksissa ei pääsääntöisesti kuitenkaan olla raportoitu kehitettyjen keräimien taajuuskaistan leveyksiä, joten mittasuureen tuomaa vertailumahdollisuutta ei aina voida hyödyntää. [26]

Vaikka kaistanleveyden hyvyysluku onkin kaiken kaikkiaan erinomainen mittasuure, ei se kuitenkaan joka tilanteessa ole täysin ongelmaton. Epälineaarisesti toimivien keräimien eräs huono puoli on tehospektrin ennalta arvaamaton käyttäytyminen. Toisin kuin lineaarisesti toimivien keräimien, epälineaaristen keräimien tehospektrit eivät muodosta

selkeälinjaista piikkiä resonanssitaajuudelleen. Arvaamattoman käyttäytymisen takia keräimen tehospektrin 1 dB:n taajuuskaita ei välttämättä ole jatkuva, vaan voi sijaita osittaisina pätkinä erisuuruisilla taajuuksilla. Myös yksittäinen tehopiikki saattaa aiheuttaa muuten leveän taajuuskaistan katkeamisen. Hajanaisen ja ennalta arvaamattoman tehospektrin takia kaistanleveyden hyvyysluku ei kaikilla keräimillä ole välttämättä yksikäsitteinen, mikä aiheuttaa ongelmia vertailun suhteen. [22]

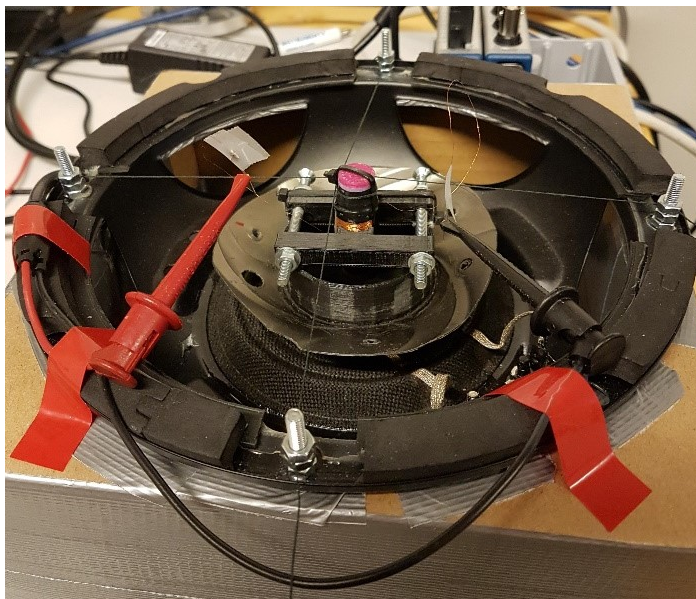
5. MITTAUSJÄRJESTELYT

Diplomityössä rakennettuja induktiivisia keräimiä pyrittiin testaamaan mahdollisimman monipuolisesti diplomityössä rakennetulla mittauslaitteistolla. Mittauksissa ulkoisena energianlähteenä toimiva mekaaninen värähtely tuotettiin tavallisen bassokaiutinelementin avulla. Kaiutinelementin tuottaman värähtelyn amplitudia ja taajuutta ohjattiin funktiogeneraattorin tuottaman sinimuotoisen ohjaussignaalin ja vahvistimen avulla. Prototyyppikeräimien mekaanisesta värähtelystä indusoima jännite syötettiin kuormavastukselle, jonka resistanssin suuruutta voitiin säätää. Kuormavastuksen yli muodostunutta jännitettä mitattiin oskilloskoopilla ja PC:n (engl. personal computer) avulla analysoitiin kuormavastukseen siirtyneitä tehoja. Kaiutinelementin tuottaman mekaanisen värähtelyn amplitudia mitattiin laser-anturin avulla. Mittauslaitteiston lohkokaavio on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Mittausjärjestelyjen lohkokaavio.

Mittauksia varten kaiutinelementtiä jouduttiin kuitenkin rakenteellisesti muokkaamaan. Kaiutinelementin synnyttämän ylimääräisen melun minimoimiseksi, siitä poistettiin elementin värähtelevä kalvo. Tämän lisäksi prototyyppikeräimien kiinnittämistä varten kaiutinelementin keskelle liimattiin 3D-tulostettu kiinnikerakenne. Muokatun kaiutinelementin rakenne on esitetty kuvassa 16. Bassokaiutinelementti ei muokkausten jälkeen osoittanut vielä täysin ideaaliseksi värähtelyn tuottajaksi. Kaiutinelementin ja sen rungon omista resonanssivärähtelyistä aiheutui häiriöitä mittauksiin erityisesti mittauksissa käytetyn taajuusikkunan alapäässä. Rungon värähtelyn vaikutuksesta kaiutinelementin keskiöön kiinnitetty prototyyppikeräin koki vertikaalisen värähtelyä lisäksi myös horisontaalista värähtelyä, joka lisää keräimen sisällä värähtelevän magneettipiirin kokemaa vaimennusta. Vaimennuksen kasvaessa magneettipiirin liikkeen nopeus sekä sen kiihtyvyys pienenevät ja keräimen indusoima jännite pienenee.



Kuva 16. Ulkoisena värähtelylähteenä mittauksissa käytettiin rakenteellisesti muokattua bassokaiutinelementtiä.

Kaiutinelementin rungon epäsuotuisa värähtely vaimeni kuitenkin nopeasti taajuuspyyhkäisyn taajuuden kasvaessa ja korkeammilla taajuuksilla havaittiin vain vähän epäsuotuisaa värähtelyä. Ylimääräisen värähtelyn vaimenemista selittää kaiutinelementin tuottaman mekaanisen värähtelyn amplitudin voimakas pieneneminen ohjaussignaalin taajuuden kasvaessa, mikä johtuu kaiutinelementin tavasta tuottaa ääntä ja äänenpaineen taajuusriippuvuudesta. Kaiutinelementin tuottamaa epäsuotuisaa värähtelyä olisi pystytty vaimentamaan ja ehkäisemään myös taajuuspyyhkäisyn matalilta taajuuksilta ankkuroimalla kaiutinelementti suureen massaan, mutta nopean vaimenemisen takia sitä ei tämän diplomityön puitteissa tehty.

Käytössä olevan mittauslaitteiston avulla keräimien toiminnasta haluttiin kerätä dataa useilta taajuuksilta ja voimakkuuksiltaan eri suuruisista värähtelyistä. Prototyypikeräimien suorituskyvyn määrittämisessä keskityttiin kahdenlaisiin mittauksiin, joista kumpikin suoritettiin aina neljällä eri ulkoisen värähtelyn voimakkuudella:

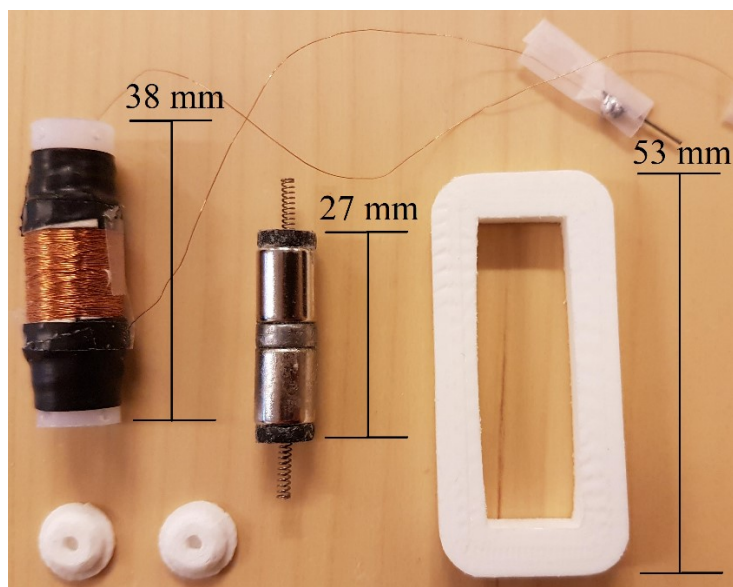
- Taajuuspyyhkäisymittaus: Funktiogeneraattori asetettiin tuottamaan taajuuspyyhkäisy 35 Hz – 105 Hz:n taajuuskaistan yli. Pyyhkäisyn kestoksi asetettiin 140 sekuntia (2 s / Hz), jonka aikana oskilloskooppi tallensi keräimen kuormavastuksen yli indusoiman jännitteen. Taajuuspyyhkäisyn jälkeen PC laski kuormaan siirtyneen tehon.
- Resonanssitaajuusmittaus: Mittauksessa etsittiin manuaalisesti kokeilemalla energiakeräimen resonanssitaajuutta, jolta oskilloskooppi mittasi kuormavastuksen yli indusoituneen jännitteen. Jännitteen mukaan PC laski kuormaan siirtyneen hetkellisen ja keskimääräisen jatkuvan tehon.

6. PROTOTYYPPIKERÄIMET

Diplomityön tavoitteena oli selvittää induktiivisten keräimien käyttökelpoisuus energian keräämiseen teollisissa olosuhteissa. Ulkoiseksi energianlähteeksi diplomityössä valittiin mekaaninen värähtely, sillä kineettistä energiaa esiintyy runsaasti erilaisissa käytännön sovelluskohteissa koneiden ja ihmisen vaikutuksesta. Talteen kerättyä energiaa voitaisiin käyttää esimerkiksi teollisen prosessin mittaamiseen ja mittausdatan langattomaan siirtoon, jolloin keräimen tuottaman tehon tulisi olla suuruudeltaan kymmeniä milliwatteja.

Käytännön sovelluskohteisiin integroimista silmällä pitäen prototyyppikeräimien suunnittelun lähtökodaksi valittiin keräimen koon pitäminen pienenä. Diplomityön puitteissa rakennettiin kaksi fyysiseltä kooltaan eri suuruista induktiivista energiakeräintä. Prototyyppikeräimen 1 fyysinen koko suunniteltiin samaan kokoluokkaan elektroniikkalaitteissa teholähteenä tyypillisesti esiintyvien AA-paristojen kanssa ($8,34 \text{ cm}^3$). Valmiista keräimestä tuli lopulliselta kooltaan hieman suunniteltua pienempi ($6,77 \text{ cm}^3$).

Energian keräämiseen tarvittavan järjestelmän suurimpana yksittäisenä komponenttina keräin vaikuttaa suuresti koko järjestelmän vaatimaan tilaan. Järjestelmän integroitavuuden parantamiseksi keräimen dimensioita päätettiin edelleen pienentää prototyyppikeräin 2:seen. Keräimen pituudesta ja halkaisijasta saatiin pois muutamia millimetrejä ja lopulliseksi tilavuudeksi keräimelle saatiin $4,67 \text{ cm}^3$, joka lähentelee kokoluokaltaan jo astetta pienempää AAA-paristoa ($3,85 \text{ cm}^3$).



Kuva 17. Prototyyppikeräin 2 avattuna. Keräimien rakenne koostuu 8:stä osasta, jotka vasemmalta oikealle ovat: runko, kela, päätypalat, jousien kiinnikkeet, jouset, magneetit, välikapale ja päätypalojen suljin.

Rakennettujen prototyypikeräimien rakenne haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisena, jotta keräimiä olisi helppo rakentaa käsin. Keräimet koostuivat 8:sta eri komponentista, jotka näkyvät kuvassa 17. Rakenteellisten komponenttien ominaisuudet pyrittiin pitämään mahdollisimman vakioina eri keräinprototyyppien välillä. Keräinprototyyppien 1 ja 2 välillä ainoastaan keräimen rungon ja magneettien halkaisijat sekä rungon pituus muuttuvat. Kummankin prototyypikeräimen tekniset tiedot ovat taulukoitu rinnakkain taulukkoon 1.

Prototyypikeräimissä kokeiltiin eri jousivakiollisten jousien vaikutusta keräimien tuottamaan tehoon. Rakentamisessa käytettiin kuitenkin vakiojousia, jolloin keräimien rungon korkeus määritti, minkälaisia jousivakioita saatiin testaukseen käyttöön. Eri jousivakioita saatiin testaukseen yhdeksän kappaletta, joista lopulliseen mittaukseen valikoitui prototyypikeräimen 1 tapauksessa kolme ja prototyypikeräimen 2 tapauksessa kaksi jousivakiota. Vakiojouset olivat halkaisijaltaan hyvin pieniä, eivätkä ne pysyneet paikoillaan ilman PLA:sta (engl. Polylactide) 3D-tulostettuja pidikekiekkoja

Taulukko 1. Rakennettujen prototyypikeräimien tekniset mitat ja tiedot.

	Prototyypikeräin 1	Prototyypikeräin 2
Magneetti	NdFeB	NdFeB
Magneetin korkeus	10 mm	10 mm
Magneetin halkaisija	10 mm	8 mm
Välikappaleen materiaali	Fe	Fe
Välikappaleen korkeus	3 mm	3 mm
Välikappaleen halkaisija	10 mm	8 mm
Jousen lepopituus	8,7 mm	8,7 mm
Jousivakio	0,83 / 1,83 / 2,20 N/mm	0,69 / 0,83 N/mm
Jousen pidikkeiden materiaali	PLA	PLA
Jousen pidikkeiden korkeus	2 mm	2 mm
Putken materiaali	PTFE	PTFE
Putken halkaisija (ulko / sisä)	12 mm / 10 mm	10 mm / 8 mm
Putken korkeus	40 mm	38 mm
Kelan materiaali	Cu	Cu
Kelan korkeus	~ 10 mm	~ 10 mm
Kelan kierrosten lkm	~ 500	~ 500
Kelan langan paksuus	0,1 mm	0,1 mm

Prototyypikeräimien runko muodostuu PTFE-putkesta (engl. Polytetrafluoroethylene), jonka ensisijaisena tehtävänä on ohjata ja suojata sen sisällä värähtelevää magneeteista ja rautakiekosta koostuvaa magneettipiiriä. Tämän lisäksi runko toimii tukialustana sen ympärille käämitylle kelalle, johon keräimen tuottama jännite indusoituu. PTFE, joka tunnetaan paremmin teflon-kauppanimellään, soveltuu runkomateriaaliksi hyvin sen alhaisen kitkakertoimen (0,05 – 0,1) takia, jolloin rungon sisällä liikkuva magneettipiiri hidastuu kitkan vaikutuksesta mahdollisimman vähän.

Magneettiipiiri ei kuitenkaan liikkunut kitkattomasti PTFE-rungon sisällä, vaan se hankasi rungon seinämiä voimakkaasti. Yhteen puristamalla kootun magneettiipiirin rautainen välikappale ei pysynyt paikoillaan, vaan puristui magneettien hylkimisvoimien vaikutuksesta päin putken seinämää. Puristuksen vaikutuksesta systeemiin syntyi kitkaa, joka vaikutti voimakkaasti keräimen indusoimaan jännitteeseen. Rautainen välikappale saatiin pysymään oikealla paikallaan liimaamalla magneettiipiirin osat toisiinsa, jolloin magneettien hylkimisvoima ei riittänyt vääntämään rautakiekkoa pois paikoiltaan.

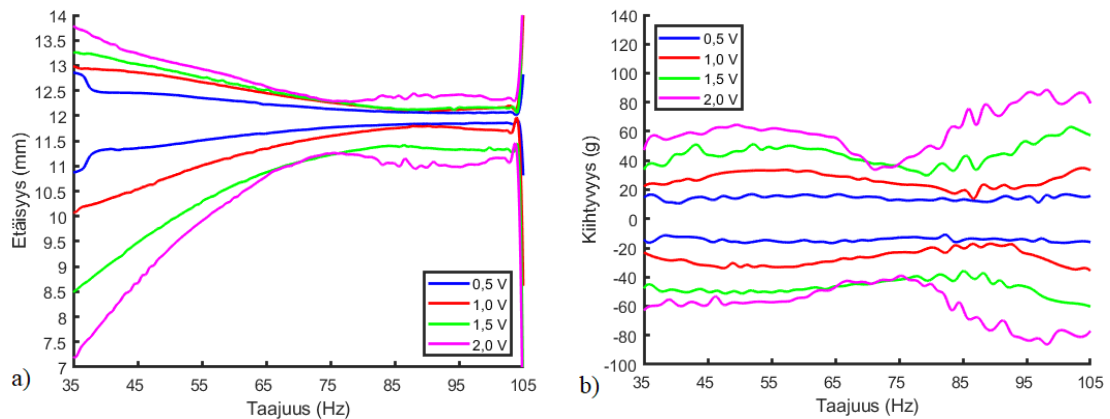
Kitkan lisäksi magneettiipiirin värähtelyliikettä vastustaa keräimen rungon sisälle loukuun jäävä ilma. Ilmanvastuksen vaikutuksen suuruutta ei tämän diplomityön puitteissa tutkittu. Ilmanvastuksen vaikutus rakennetuissa prototyyppikeräimissä kuitenkin minimoitiin poraamalla keräimien runkoon reikiä sen kumpaakin päähän, jotta ilma pääsee vapaasti liikkumaan pois värähtelevän magneettiipiirin edestä.

7. MITTAUSTULOKSET

Tässä luvussa esitellään diplomityön mittauksissa kerätty data prototyypikeräimistä sekä bassokaiutinelementillä tuotetusta mekaanisesta värähtelystä. Usean mittalaitteen datan keräämisen sekä funktiogeneraattorin taajuuspyyhkäisyn aktivoimisen täydellinen synkronoiminen osoittautui hankalaksi. Synkronoinnin epätarkkuudesta johtuen muutamissa seuraavien kappaleiden yhteydessä esitetyissä kuvaajissa esiintyy kuvaajan trendiin sopimattomia suuria piikkejä taajuuskaistan alku- tai loppupäässä. Tulokset on esitetty kuvissa kaiutinelementin ohjausjännitteen avulla ja kuvaajien selitteissä olevat jännitearvot viittaavat funktiogeneraattorin sinimuotoisen ohjaussignaalin amplitudiin.

7.1 Mekaaninen värähtely

Kuvan 18a kuvaajissa on esitetty kaiutinelementin keskiön etäisyys siirtymäanturista taajuuspyyhkäisymittauksen aikana. Etäisyyksien ääriarvoista voidaan määrittää tuotetun mekaanisen värähtelyn amplitudi, joka pienenee nopeasti taajuuksien kasvaessa. Värähtelyn amplitudi tasoittuu muutamia millimetreihin mittauksen taajuusikkunan noin puolessa välissä. Värähtelyn amplitudi jää tämän jälkeen varsin pieneksi, mutta kuten yhtälössä (18) on esitetty, induktiivisen keräimen tuottaman tehon suuruuteen vaikuttaa neliöllisesti ulkoisen värähtelyn kiihtyvyys.



Kuva 18. Bassokaiutinelementin tuottaman värähtelyn ominaisuudet neljällä eri funktiogeneraattorin ohjausjännitteellä. Kuvassa a) on prototyypikeräimen etäisyys siirtymäanturista taajuuden funktiona. Kuvassa b) on siirtymäanturin datasta lasketut mekaanisen värähtelyn kiihtyvyyden huippuarvot taajuuden funktiona.

Kaiutinelementin tuottamien värähtelyjen kiihtyvyydet on esitetty kuvassa 18b. Mittauksissa pystyttiin tuottamaan värähtelylle jopa 90g:n suuruinen kiihtyvyys. Suurempiakin kiihtyvyyksiä olisi mittauksissa käytetyllä kaiutinelementillä ollut saavutettavissa, mutta epäideaalisen kiinnitystavan takia kaiutinelementtiä ei uskallettu

enää ohjata amplitudiltaan suuremmalla ohjaussignaalilla mittausten aikana. Mittauksissa käytetyistä värähtelyistä ainoastaan kahdella heikoimmailla värähtelyllä mitattu kiihtyvyys pysyy suhteellisen vakiona koko taajuusikkunan matkalla. Kaiutinelementin tuottaman värähtelyn kiihtyvyyden vaihtelu yksittäisen taajuuspyyhkäisymittauksen aikana heikentää hieman sähköiseen kuormaan siirtyneiden tehojen keskinäistä vertailukelpoisuutta.

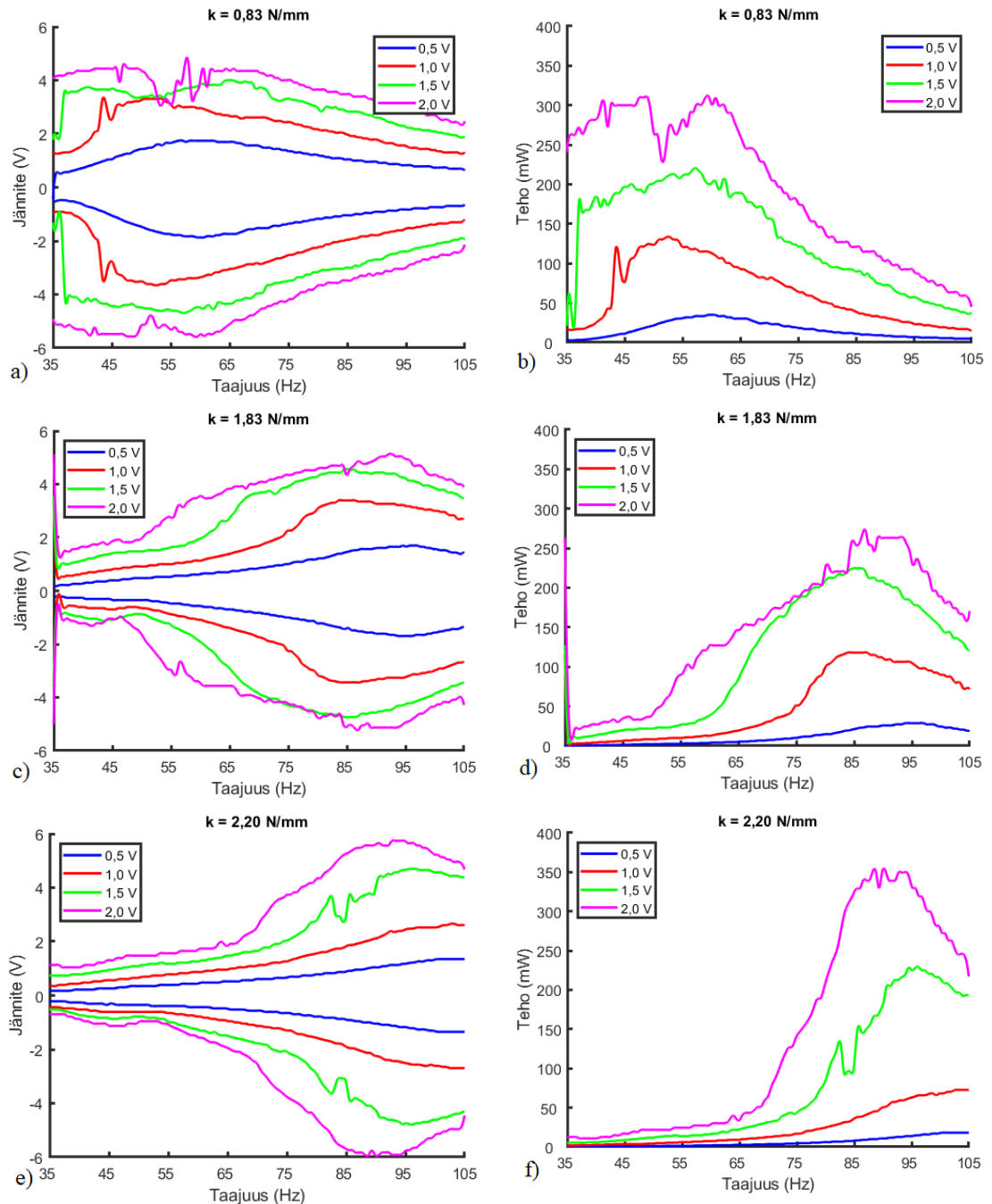
7.2 Prototyyppikeräin 1

Taulukkoon 2 on koottu resonanssitaajuusmittauksista kerätty data prototyyppikeräin 1:n osalta. Mekaanisen värähtelyn voimakkuus kasvaa taulukon sarakkeissa vasemmalta oikealle ja värähtelijän jousien jäykkyys ylhäältä alaspäin. Taulukoidut arvot ovat kyseisen mittaustilanteen ja keräimen kokoonpanon kuormavastukseen tuottaman jatkuvan keskimääräisen tehon maksimiarvo ja taajuus, jolta maksiarvo on mitattu (eli resonanssitaajuus). Taulukoidut resonanssitaajuudet siirtyvän taajuuksissa hieman alemmas ulkoisen värähtelyn voimakkuuden kasvaessa. Kyseisen ilmiö esiintyy myös kuvan 19 kuvajissa ja niiden huippukohdissa. Ulkoisen värähtelyn voimakkuuden ei luvussa 2 esitetyn analyysin mukaan pitäisi vaikuttaa lineaarisesti toimivan induktiivisen keräimen resonanssitaajuuteen. Resonanssitaajuuden siirtyminen viittaa vähäisen epälineaarisuuden läsnäoloon systeemissä, mikä diplomityön prototyyppikeräimien osalta ei ole suunniteltu tilanne.

Taulukko 2. Prototyyppikeräimen 1:n kuormavastukseen ($R_L = 100 \Omega$) siirtämien keskimääräisten tehojen maksimiarvot sekä niiden mittaustaajuudet.

k (N/mm)	V _{out, sg} (V)			
	0,5	1,0	1,5	2,0
0,83	14,14 mW	46,52 mW	70,19 mW	82,69 mW
	/ 60 Hz	/ 56 Hz	/ 62 Hz	/ 63 Hz
1,83	13,19 mW	51,47 mW	98,52 mW	124,8 mW
	/ 97 Hz	/ 86 Hz	/ 85 Hz	/ 92 Hz
2,20	14,15 mW	37,98 mW	103,1 mW	139,7 mW
	/ 105 Hz	/ 103 Hz	/ 99 Hz	/ 88 Hz

Kuvaan 19 on koottu prototyyppikeräimen 1 osalta taajuuspyyhkäisymittauksissa kerätty data. Vasemmassa sarakkeessa on esitetty taajuuspyyhkäisyn aikana keräimen kuormavastuksen yli indusoima jännite kolmella eri jousivakion jousilla. Keräimen indusoima jännite kasvaa koko taajuuskaistan leveydeltä värähtelyn voimakkuuden lisääntyessä. Kuorman yli indusoitunut jännite myös kasvaa, mitä lähemmäksi keräimen resonanssitaajuutta taajuuspyyhkäisyssä siirrytään. Resonanssitaajuudella sijaitseva jännitepiikki siirtyy kuvaajissa jousivakion vaikutuksesta. Jousivakion kasvaessa resonanssitaajuus siirtyy korkeammille taajuuksille. Mittauksissa käytettyjä jousia jäykempien tai löysempien jousien käyttäminen siirtää keräimien tuottamat korkeammat jännitteet pois diplomityön kannalta mielenkiintoiselta taajuuskaistalta.



Kuva 19. Prototyypikeräin 1:n taajuuspyyhkäisymittauksien data. Vasemmassa sarakkeessa on esitetty kuormavastuksen ($R_L = 100 \Omega$) yli indusoitunut jännite taajuuden funktiona kolmella eri jousivakion jousilla. Oikeassa sarakkeessa on esitetty kuormavastukseen siirtynyt teho taajuuden funktiona. Mittaukset on toistettu neljällä eri funktiogeneraattorin ohjausjännitteellä.

Löysimmän jousen mittauksissa voimakkaimmalla värähtelyllä taajuuskaistan alapäässä prototyypikeräimen 1 sisällä liikkuva magneettipiiri alkoi törmäämään rungon päissä oleviin päätypaloihin. Mekaanisen törmäyksen takia keräimen indusoimaan sinimuotoiseen jännitteeseen syntyi paljon häiriötä, joka ilmenee jännitteen amplitudin epämääräisenä muutoksena 60 Hz:n ympäristössä kuvassa 19a. Vastaavanlainen indusoituneen jännitteen amplitudin epämääräinen muutos ilmenee jäykimmän jousen tapauksessa toiseksi

voimakkaimmalla värähtelyllä 85 Hz:n ympäristössä kuvassa 19e. Kyseisen häiriön tapauksessa magneettipiirin osumista keräimen päätypaloihin ei havaittu, vaan häiriö syntyi todennäköisesti kaiutinelementin rungossa esiintyvien resonanssivärähtelyiden vaikutuksesta.

Kuvan 19 oikeaan sarakkeeseen on koottu vasemman sarakkeen indusoituneita jännitteitä vastaavat kuormavastukseen siirtyneet tehot. Tehojen kuvaajista on myös luettavissa samat häiriöt, jotka vaikuttavat indusoituneeseen jännitteeseen. Voimakkuudeltaan heikommalla värähtelyllä saavutetaan leveämpi taajuuskaista, mutta tällöin keräimen tuottama maksiteho jää varsin vaatimattomaksi. Värähtelyn voimistuessa sähköiseen kuormaan tuotettu maksimiteho kasvaa ja vastaavasti keräimen taajuuskaista kapenee. Värähtelyn ollessa voimakkaampaa löysemmillä jousilla keräimen taajuuskaista on hieman leveämpi kuin jäykimmällä jousella.

7.3 Prototyyppikeräin 2

Prototyyppikeräimen 2:n tapauksessa ainoastaan mittausten voimakkuudeltaan heikoimmalla värähtelyllä energiakeräin toimii lineaarisesti. Ulkoisen värähtelyn voimistuessa putken sisällä liikkuva magneettipiirin alkaa nopeasti osumaan rungon päissä oleviin korkkeihin. Mekaanisten törmäysten vuoksi systeemi muuttuu lineaarisesta epälineaariseksi. Epälineaarisuus näkyy myös kuvan 20 vasemmassa sarakkeessa olevista indusoituneen jännitteen kuvaajien muodosta.

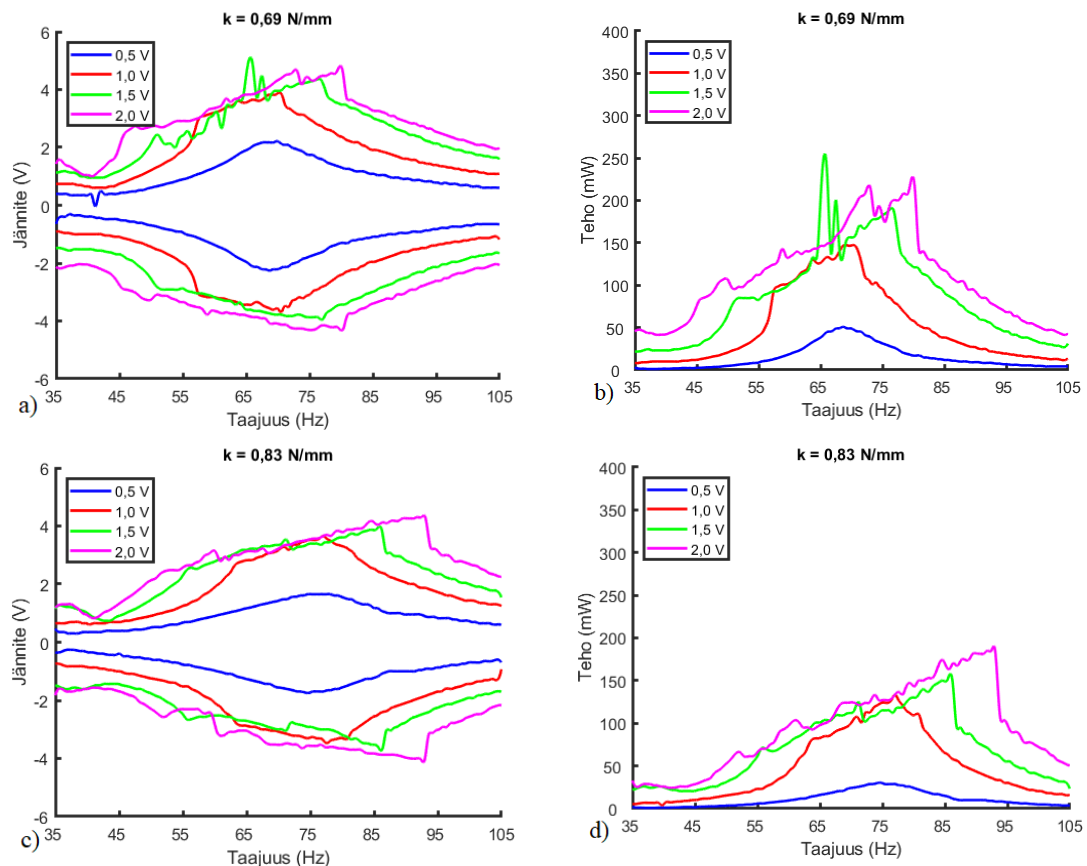
Prototyyppikeräimen 2 indusoimista jännitteistä voidaan havaita luvussa 3.2.4 esitettyjä piirteitä, kuten resonanssihuipun tasoittumisen korkeammille taajuuksille. Keräimessä esiintyvää magneettipiirin rungon päihin osumista selittää magneettipiirin liikkeen nopeuden kasvu verrattuna prototyyppi 1:n magneettipiiriin. Nopeuden kasvuun eniten vaikuttaa magneettipiirin massan pieneminen, mikä johtuu keräimen halkaisijan kaventamisesta. Kuvan 20 oikeassa sarakkeessa kuormavastukseen siirtyvä teho pienentyy nopeasti tietyn taajuuden jälkeen. Tarkemmassa tarkastelussa huomattiin tehon pienentyvän taajuudella, jossa magneettipiiri lakkaa osumasta rungon päissä oleviin päätypaloihin ja epälineaarinen käytös muuttuu taas lineaariseksi.

Taulukkoon 3 on koottu prototyyppikeräimen 2 kuormavastukseen siirtämien jatkuvien keskimääräisten tehojen maksimi-arvot ja niiden mittaustaajuuudet. Voimakkuudeltaan pienimmässä värähtelyssä, jossa keräin käyttäytyy vielä lineaarisesti, saavutetaan sama tuotettu teho kuin prototyyppikeräin 1:llä. Värähtelyn voimakkuuden kasvaessa alkaa keräimen epälineaarinen käyttäytyminen ja magneettipiirin törmäyksen päätypaloihin rajoittavat kuormaan siirtyneen tehon määrään. Suuremmilla värähtelyn voimakkuuksilla prototyyppikeräimen 2 tuottama jatkuva keskimääräinen teho jää selvästi pienemmäksi kuin prototyyppikeräimen 1 tuottama.

Taulukko 3. Prototyyppikeräimen 2:n kuormavastukseen ($R_L = 100 \Omega$) siirtämien keskimääräisten tehojen maksimiarvot sekä niiden mittaustaajuudet.

k (N/mm)	$V_{out, sg}$ (V)			
	0,5	1,0	1,5	2,0
0,69	10,48 mW / 75 Hz	29,01 mW / 74 Hz	55,75 mW / 71 Hz	64,86 mW / 75 Hz
0,83	12,86 mW / 74 Hz	58,26 mW / 76 Hz	68,96 mW / 84 Hz	76,46 mW / 87 Hz

Kuvassa 20 on esitetty prototyyppikeräimen 2 osalta taajuuspyyhkäisymittauksissa kerätty data. Vasemmassa sarakkeessa on esitetty keräimen kuormavastuksen yli indusoima jännite ja oikeassa sarakkeessa kuormavastukseen siirtynyt hetkellinen teho. Prototyyppikeräimestä 1 poiketen, keräimen 2 osalta vain kahdella testauksessa käytössä olleella jousivakiolla saatiin keräimen resonanssitaajuus osumaan mittauksien taajuusikkunaan. Prototyyppikeräimen 2:n mittauksissa löysemmällä jousella saavutettiin suuremmat indusoituneet jännitteet ja kuormavastukseen siirtyneet tehot.

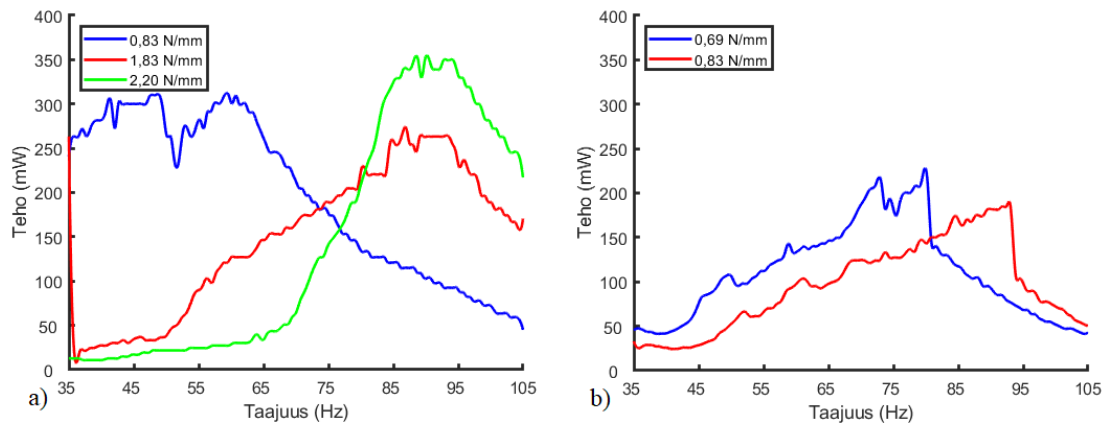


Kuva 20. Prototyyppikeräin 2:n taajuuspyyhkäisymittauksien data. Vasemmassa sarakkeessa on esitetty kuormavastuksen ($R_L = 100 \Omega$) yli indusoitunut jännite kahdella eri jousivakion jousilla. Oikeassa sarakkeessa on esitetty kuormavastukseen siirtynyt teho. Mittaukset on toistettu neljällä eri funktiogeneraattorin ohjausjännitteellä.

Taulukkoon 3 kirjatut löysemmän jousen manuaalisesti määritetyt resonanssitaajuudet eivät vastaa kuvan 20 oikeassa sarakkeessa olevia hetkellisen tehon huippukohtia. Huono korrelaatio datojen välillä selittyy osaksi keräimen epälineaarisen käyttäytymisen takia. Prototyypikeräimen 2:n epälineaarisuuden takia sen resonanssitaajuuksien määrittäminen käsin osoittautui melko haastavaksi, sillä keräimen kuorman yli indusoima jännite ei käyttäytynyt vakaasti lineaarisen prototyypikeräin 1:n tavoin.

7.4 Suorituskyky

Kuvassa 21 on esitetty keräimien välisen suorituskyvyn vertailun helpottamiseksi kummankin prototyypikeräimen kuormavastukseen siirtämät hetkelliset tehot ulkoisen värähtelyn ollessa voimakkaimmillaan. Prototyypikeräin 1 tuottaa suuremman tehon kuormavastukseen mittauksissa käytetyssä taajuusikkunassa. Prototyypikeräin 1:n tapauksessa jousen jäykkyydellä on suurempi vaikutus keräimen toimintaan ja sen avulla voidaan optimoida keräimen maksimitohon ja taajuuskaistan suhdetta. Prototyypikeräimen 2 tapauksessa jousivakion muuttuessa keräimen toiminta ei juurikaan muutu. Kuvassa 21b prototyypikeräimen 2 jousivakion muutos on kuitenkin vain $0,14 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$, kun se kuvassa 21a prototyypikeräimellä 1 on pienimmillään $0,37 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$.



Kuva 21. Kuormavastukseen siirtyneet hetkelliset tehot kaiutinelementin värähtelyn ollessa voimakkainta. Kuvassa a) prototyypikeräimen 1:n ja kuvassa b) prototyypikeräimen 2:n tulokset.

Taulukossa 4 on esitetty diplomityössä rakennettujen prototyypikeräinten suorituskykyä kuvaavia mittasuureita, jotka on esitelty tarkemmin luvussa 4. Kuten edellä olevissa kapaleissa on esitetty, prototyypikeräin 1 tuottaa suuremman tehon. Tämän lisäksi sillä on myös prototyypikeräintä 2 suurempi tehotiheys sekä kaistanleveys. Kuitenkin loppujen taulukossa 4 olevien suorituskykyä kuvaavien mittasuureiden mukaan prototyypikeräin 2 saavuttaa rakennetuista keräimistä paremman suorituskyvyn. Molempien prototyypikeräinten kohdalla taulukon 4 suorituskykyä kuvaavien mittasuureiden mukaan keräimen toiminta on hyvin kaukana täysin optimaalisesta tilanteesta ja käyttämätöntä tehon tuottamispotentiaalia on paljon.

Taulukko 4. Rakennettujen prototyypikeräimien suorituskyvyn hyvyttä kuvaavia mittasuureita, joita on esitelty luvussa 4.

	Kaistan- leveys, 3 dB (Hz)	Kaistan- leveys, 1 dB (Hz)	PD ($\frac{\text{mW}}{\text{cm}^3}$)	NPD ($\frac{\text{kg}\cdot\text{s}}{\text{m}^3}$)	E _H (%)	FoM _V (%)	FoM _{BW} (%)
Proto- tyyppi 1	26,7*	17,1	51,6	0,0882	5,52	0,865	0,161
Proto- tyyppi 2	33,0	11,7	45,5	0,197	14,8	1,68	0,262

*Taajuuspyyhkäisy loppuu ennen kuin keräimen taajuuskaistan yläraja saavutetaan

8. YHTEENVETO

Diplomityössä tutkittiin lineaarisesti toimivia induktiivisia keräimiä ja sen tavoitteena oli määrittää induktiivisten keräämismenetelmien soveltuvuus energian keräämiseen käytännön sovelluskohteissa. Ensisijaiseksi teholähteeksi soveltuvuuden kannalta keräimen perustavanlaatuisena ja tärkeimpänä ominaisuutena voidaan pitää sen kykyä tuottaa jatkuvaa tehoa sähköiseen kuormaan. Työn teoreettisessa osuudessa rakennetuilla, rakenteellisesti yksinkertaisilla ja lineaarisesti toimivilla, prototyypikeräimillä oli tarkoitus testata kompaktin kokoisten induktiivisten keräimien tuottaman jatkuvan tehon suuruus. Koska prototyypeillä oli tarkoitus varmentaa induktiivisten keräimien kyvykkyys tuottaa tehoa, niitä ei tietoisesti optimoitu minkään tunnetun yksittäisen sovelluskohteen parametrien mukaan.

Rakennetuista prototyypikeräimistä suurempi, kooltaan hieman AA-paristoa pienempi, tuotti mittauksissa ulkoisen värähtelyn ollessa voimakkainta kuormavastukseen jatkuvaa keskimääräistä tehoa parhaimmillaan 139,7 mW. Prototyypikeräimistä pienempi puolestaan tuotti vastaavassa tilanteessa kuormavastukseen jatkuvaa keskimääräistä tehoa parhaimmillaan 76,46 mW. Kummankin diplomityössä rakennetun keräimen tuottama teho on riittävän suuri, jotta yksinkertainen mittaussensori saadaan toimintaan. Keräimien tuottama teho riittää myös langattoman tiedonsiirron käyttämiseen sensorissa, kun tiedonsiirrossa hyödynnetään matalatehoisia tiedonsiirtoteknologioita, kuten Bluetooth Low Energy:a tai ZigBee:tä [27].

Keräimien ulkoisesta energianlähteestä tuottama teho on valitettavasti kuitenkin taajuusriippuvaa ja taajuusriippuvuuden myötä keräimien taajuuskaistan leveys vaikuttaa suuresti niiden yleiskäyttöisyyteen. Diplomityön puitteissa keräimien tehon tuottamista tarkasteltiin 35 – 105 Hz:n taajuusikkunassa. Kyseiset taajuudet ovat suurempia kuin ihmisen liikkeissä esiintyvien värähtelyiden taajuudet, mutta niitä esiintyy runsaasti erilaisten koneiden yhteydessä. Rakennettujen prototyypikeräimien 1 ja 2 dB:n taajuuskaistojen suuruuksiksi määritettiin 17,1 Hz ja 11,7 Hz. Taajuuskaistojen suuruudet ovat riittäviä, mikäli sovelluskohteessa energianlähteenä toimivan ulkoisen värähtelyn taajuusspekt-rissä havaittavat dominoivat taajuudet sijaitsevat suhteellisen lähellä toisiaan. Mikäli ulkoinen värähtely on taajuuskäyttäytymiseltään epämääräinen tai ajansuhteen muuttuva, rakennettujen keräimien käyttökelpoisuus pienenee huomattavasti.

Keräimien teholähteeksi soveltuvuuden kannalta tärkeää on niiden tehon tuottamiskyvyn lisäksi niiden fyysinen koko. Mitä pienempi keräimestä saadaan rakenteellisesti valmistettua, sitä pienempään kokoon koko sovelluskohteen elektroniikka saadaan mahdutettua. Laitteiston koko vaikuttaa merkittävästi sen käyttöönottamisen ja asentamisen helppou-teen. Käytännön sovelluskohteesta riippuen laitteen koko voi merkittävästi parantaa sen käyttömukavuutta tai pahimmassa tapauksessa tehdä laitteesta jopa käyttökelvottoman.

Diplomityössä rakennettujen prototyypikeräimien 1 ja 2 tilavuuksiksi mitattiin $6,77 \text{ cm}^3$ ja $4,67 \text{ cm}^3$. Kokoluokaltaan keräimet vastaavat suunnilleen tavallisia sormiparistoja. Rakennetut keräimet ovat kokonsa puolesta suhteellisen helppoja integroida elektroniikan teholähteiksi sovelluskohteisiin, joissa elektroniikalle mitoitettu tila on joka suuntaan useita senttimetrejä. Tätä pienemmissä sovelluskohteissa induktiivisten keräimien käyttö vaatii huolellista suunnittelua. Millimetrituokan ja sitä pienempien sovelluskohteiden yhteydessä fyysisesti rajoitettu tila voi alkaa näkymään ongelmina tuotetun tehon suuruudessa.

Induktiivisten keräimien ulkoisena energianlähteenä toimiva kineettinen energia on usein mekaanista liikettä, kuten värähtelyä. Kerätäkseen energiaa talteen keräimen tulee olla vuorovaikutuksessa ulkoisen energianlähteen kanssa, minkä takia keräin voi sovelluskohteesta riippuen altistua voimakkailla iskuille, tärinälle ja suurille kiihtyvyyksille. Keräimen koolla, sen rakenteella ja siihen käytetyillä materiaaleilla on kaikilla vaikutus keräimen mekaaniseen kestävyyskykyyn. Diplomityössä rakennetut keräimet altistuivat mittauksissa suurimmillaan noin 90g:n suuruiselle kiihtyvyydelle. Rakennetuissa keräimissä ei havaittu mittauksen ja testien aikana merkkejä suurista tai merkittävistä rakenteellisista vaurioista tai vioista.

Diplomityön puitteissa tehtyjen testien, mittauksen ja havaintojen perusteella rakennetuista prototyypikeräimistä prototyyppi 1:n arvioidaan soveltuvan prototyyppi 2:sta paremmin tehonlähteeksi käytännön sovelluskohteeseen. Vaikka prototyyppi 1 onkin kooltaan keräimistä hieman suurempi, sen sähköiseen kuormaan tuottama suurempi teho ja sen lineaarinen käyttäytyminen tekevät siitä epälineaarisesti käyttäytyvää prototyyppi 2:sta paremman ja yleiskäyttöisemmän vaihtoehdon. Diplomityön tulokset voimistavat edelleen aiemmista tutkimuksista saatua käsitystä induktiivisten keräimien potentiaalista toimia tehonlähteenä senttimetrituokan sovelluskohteissa. Muutamia lineaarisesti toimivia kaupallisia induktiivisia keräimiä löytyykin jo markkinoilta, mutta ne ovat kooltaan hieman diplomityössä rakennettuja keräimiä suurempia.

Prototyypikeräimen 1 jatkokehityksen kannalta hyödyllistä olisi päästä testaamaan keräimen toimintaa käytännön sovelluskohteessa, esimerkiksi teollisessa ympäristössä. Käytännön testauksessa saataisiin kerättyä arvokasta dataa siitä, kuinka keräin pystyy toimimaan ja paljonko energiaa se pystyy keräämään kontrolloimattomasta ja taajuusspektritään laajassa värähtelyssä. Käytännön sovelluskohteessa testaaminen antaa myös paremman kuvan keräimen mekaanisesta kestävyyskykyä, jolloin ulkoisen värähtelyn mahdollisesti heikentämät tai rikkomat rakenteet voidaan suunnitella uudelleen kestävämmiksi. Induktiivisen keräimen rakenteen täyden optimoimisen jälkeen voidaan kehitystyössä siirtyä energian keräämiseen tarvittavan järjestelmän muiden komponenttien ja mahdollisen demosovelluksen kehitykseen.

Toinen mielenkiintoinen suunta, johon prototyypikeräimen kehitystyötä voitaisiin jatkaa, on epälineaaristen ilmiöiden avulla saavutettavan lisäsuorituskyvyn hyödyntäminen.

Rakennettujen prototyypikeräinten suorituskyvyn todettiin mittausten pohjalta olevan kaukana teoreettisesta maksimistaan ja vastaavaa voidaan havaita myös muissa kirjallisuudessa esitetyissä tutkimuksissa. Kirjallisuudessa uskotaan epälineaarisuuden parantavan induktiivisten keräimen suorituskkyä merkittävästi ja aiemmissa tutkimuksissa onkin saatu positiivia tuloksia keräimen kasvaneen taajuuskaistan muodossa. Tässä diplomityössä esitetyistä epälineaarisista ilmiöistä helpoimmin prototyypikeräimien rakenteeseen saadaan toteutettua amplitudin rajoittaminen. Toisaalta tuotetun tehon määrän väheneminen ei käytännön sovelluskohteeseen integroinnin kannalta ole mielekäästä, joten mielenkiintoisempaa olisikin toteuttaa keräimen epälineaarisuus esimerkiksi epälineaaristen jousien avulla.

LÄHTEET

- [1] Batteries & Accumulators, European Commission, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.10.2018): <http://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/index.htm>.
- [2] Global Energy Harvesting Market Forecast 2017-2024, PR Newswire, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.5.2018): <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-energy-harvesting-market-forecast-2017-2024-300551358.html>.
- [3] Energy Efficiency, European Commission, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.10.2018): <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency>.
- [4] A. Kingatua, The How and Why of Energy Harvesting for Low-Power Applications, All About Circuits. Saatavissa (viitattu 16.10.2018): <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-why-of-energy-harvesting-for-low-power-applications/>.
- [5] C.B. Williams, R.B. Yates, Analysis of a micro-electric generator for microsystems, *Sensors & Actuators: A. Physical*, Vol. 52, Iss. 1, 1996, pp. 8-11.
- [6] T.J. Kazmierski, S. Beeby, *Energy Harvesting Systems: Principles, Modeling and Applications*, Springer-Verlag New York, New York NY, USA, 2011.
- [7] I. Shahosseini, K. Najafi, Mechanical Amplifier for Translational Kinetic Energy Harvesters, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 557, Iss. 1, 2014, pp. 012135.
- [8] K. Ashraf, M.H.M. Khir, J.O. Dennis, Z. Baharudin, Improved energy harvesting from low frequency vibrations by resonance amplification at multiple frequencies, *Sensors & Actuators: A. Physical*, Vol. 195, 2013, pp. 123.
- [9] X. Tang, L. Zuo, Enhanced vibration energy harvesting using dual-mass systems, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, Iss. 21, 2011, pp. 5199-5209.
- [10] B.L. Ooi, J.M. Gilbert, Design of wideband vibration-based electromagnetic generator by means of dual-resonator, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 213, 2014, pp. 9-18.
- [11] I. Sari, T. Balkan, H. Kulah, A Wideband Electromagnetic Micro Power Generator for Wireless Microsystems, *TRANSDUCERS 2007 - 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, IEEE, pp. 275-278.
- [12] Y. Tadesse, S. Zhang, S. Priya, Multimodal Energy Harvesting System: Piezoelectric and Electromagnetic, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, Iss. 5, 2009, pp. 625-632.

- [13] N. Tran, M.H. Ghayesh, M. Arjomandi, Ambient vibration energy harvesters: A review on nonlinear techniques for performance enhancement, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 127, 2018, pp. 162-185.
- [14] E. Blokhina, A. El Aroudi, D. Galayko, E. Alarcon, *Nonlinearity in Energy Harvesting Systems : Micro- and Nanoscale Applications*, Springer, Cham, 2016.
- [15] B.P. Mann, N.D. Sims, Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 319, Iss. 1, 2009, pp. 515-530.
- [16] D. Zhu, S. Roberts, M.J. Tudor, S.P. Beeby, Design and experimental characterization of a tunable vibration-based electromagnetic micro-generator, *Sensors & Actuators: A. Physical*, Vol. 158, Iss. 2, 2010, pp. 284-293.
- [17] R. Masana, M.F. Daqaq, Relative performance of a vibratory energy harvester in mono- and bi-stable potentials, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, Iss. 24, 2011, pp. 6036-6052.
- [18] R. Ramlan, M. Brennan, B. Mace, I. Kovacic, Potential benefits of a non-linear stiffness in an energy harvesting device, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 59, Iss. 4, 2010, pp. 545-558.
- [19] B.P. Mann, B.A. Owens, Investigations of a nonlinear energy harvester with a bi-stable potential well, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, Iss. 9, 2010, pp. 1215-1226.
- [20] M.S.M. Soliman, E.M. Abdel-Rahman, E.F. El-Saadany, R.R. Mansour, A wide-band vibration-based energy harvester, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, Iss. 11, 2008, pp. 115021.
- [21] R. Frizzell, G. Kelly, F. Cottone, E. Boco, V. Nico, D. O'Donoghue, J. Punch, Experimental characterisation of dual-mass vibration energy harvesters employing velocity amplification, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 27, Iss. 20, 2016, pp. 2810-2826.
- [22] S.P. Pellegrini, N. Tolou, M. Schenk, J.L. Herder, Bistable vibration energy harvesters: A review, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 24, Iss. 11, 2013, pp. 1303-1312.
- [23] X. Cao, W.-J. Chiang, Y.-C. King, Y.-K. Lee, Electromagnetic Energy Harvesting Circuit With Feedforward and Feedback DC-DC PWM Boost Converter for Vibration Power Generator System, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, Iss. 2, 2007, pp. 679-685.
- [24] S.P. Beeby, R.N. Torah, M.J. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O'Donnell, C.R. Saha, S. Roy, A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, Iss. 7, 2007, pp. 1257-1265.

- [25] S. Roundy, On the Effectiveness of Vibration-based Energy Harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, Iss. 10, 2005, pp. 809-823.
- [26] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, T. C. Green, Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 96, Iss. 9, 2008, pp. 1457-1486.
- [27] M. Siekkinen, M. Hienkari, J.K. Nurminen, J. Nieminen, How low energy is bluetooth low energy? Comparative measurements with ZigBee/802.15.4, 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), IEEE, pp. 232-237.